

基于透射率曲线确定聚合物太阳能电池功能层的光学常数和厚度*

黄卓寅 李国龙 李衍 甄红宇[†] 沈伟东 刘向东 刘旭

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

(2011年6月2日收到; 2011年6月24日收到修改稿)

本文介绍了一种确定聚合物太阳能电池功能层光学常数和厚度的方法. 该方法借助于特定的色散模型拟合透射率测试曲线以获得功能层光学常数和厚度值. 文中比较了 Forouhi-Bloomer 和 Lorentz-Oscillator 模型在体异质结薄膜的透射率拟合计算中的适用性, 计算了 poly(3-hexylthiophene)(P3HT)/[6,6]-phenylC₆₁-butyric acid methyl ester (PCBM) 和 poly[2-methoxy-5-5(2'-ethyl-hexyloxy)-1,4-phenylenevinylene](MEH-PPV)/PCBM 体异质结薄膜的光学常数和厚度. 拟合得到的曲线与实验曲线符合良好, 厚度计算的结果与台阶仪测量结果保持一致, 误差小于 4%. 进一步分析得到的热退火和加入高沸点溶剂添加剂后 P3HT/PCBM 薄膜的光学常数和光学禁带值与相应器件伏安特性相符. 该方法适用于所有体异质结的功能层, 可用于聚合物太阳能电池的膜系优化和在线检测.

关键词: 聚合物太阳能电池, 光学常数, 透射率曲线, Forouhi-Bloomer 模型

PACS: 88.40.jr, 82.35.Cd, 78.66.-w

1 引言

聚合物太阳能电池是一种新型的太阳能电池, 其成本低, 重量轻, 加工工艺简单, 近年来吸引了人们越来越多的关注. 作为传统硅基太阳能电池的替代者之一, 该类电池在制作大面积柔性器件上的优势尤为引人注目. 聚合物太阳能电池发展至今, 体异质结一直是其最有效的功能层结构之一^[1,2]. 体异质结是给体共轭聚合物和有机受体材料共混形成的异质结结构. 过去几年里, 研究人员研究了热退火, 溶液退火和使用高沸点溶剂添加剂等一系列方式来进一步改善体异质结结构和功能^[3-8]. 聚合物太阳能电池功能层的光学常数值和物理厚度对于电池器件性能的进一步优化有着重要意义^[9-11]. 一般来说薄膜的光学特性不同于相应的块状材料, 而作为给受体共混结构的体异质结, 其光学特性共混比例及成膜工艺的影响更加复杂. 因此简单而精确地获得薄膜的光学常数和厚度值是非常重要的.

在现有的测量的方法中, 椭偏法是应用最广泛的方法之一, 具有很高的测量灵敏度和精度. 但是它依赖于精密的测试仪器和计算模型, 并且影响其测量准确度因素很多, 如入射角、系统调整状态, 光学元件质量, 环境噪声, 实际待测薄膜与数学模型的差异等等^[12-14]; 棱镜耦合法则因为要产生一定的模式而要求薄膜厚度较厚, 而且能测得的膜层的折射率受到耦合棱镜的限制; 包络线法需要薄膜很厚以产生干涉振荡, 且要求薄膜是弱吸收的. 这些都不太适合于聚合物太阳能电池体异质结的光学性质测量^[14-16].

本文采用一种通过测量单次透射率来获得聚合物太阳能电池功能层的光学常数与物理厚度的方法. 该方法结合了特定的色散模型, 拟合计算出薄膜透过率光谱曲线, 从而得到薄膜厚度、折射率和消光系数. 我们比较了两种色散模型——Forouhi-Bloomer 模型和 Lorentz-Oscillator 模型在聚合物太阳能电池功能层的光

* 中央高校基本科研业务费专项基金 (批准号: 2009QNA5010; 2010QNA6003), 国家自然科学基金 (批准号: 61007056) 和高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 20100101120048) 资助的课题.

[†] E-mail: hongyuzhen@zju.edu.cn

学常数与物理厚度的拟合计算中的适用性,并测试了在玻璃基板上用溶液旋涂法得到的 poly(3-hexylthiophene) (P3HT)/ [6,6]-phenyl C₆₁-butyric acid methyl ester (PCBM) 和 poly[2-methoxy-5-5(2'-ethyl-hexyloxy)-1,4-phenylen-evinylene] (MEH-PPV)/PCBM 薄膜的薄膜厚度、折射率和消光系数. 该方法仅需要简单地测量透射率曲线,就可以得到聚合物太阳能电池体异质结的光学常数和物理厚度,在该种电池的实验研究和工业生产监控中都具有重要的应用价值.

2 原理

薄膜的透射率可以使用薄膜光学的原理计算得到. 当一个半无限厚的基板上有一层均匀的聚合物薄膜时,薄膜的特性矩阵可以表示为^[14]

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta & \frac{i}{\eta} \sin \delta \\ i\eta \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_s \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中, $\eta = n - ik$ 和 $\eta_s = n_s - ik_s$ 分别为薄膜和基板的复折射率. $\delta = (2\pi/\lambda)\eta d$ 是入射光正入射时该层薄膜的相位厚度, d 是薄膜的物理厚度. 由 (1) 式就可以得到薄膜和基板的组合导纳 $Y = C/B$, 因此薄膜的反射率和透射率方程可以写为

$$R = \left| \frac{n_0 B - C}{n_0 B + C} \right|^2, \quad (2)$$

$$T = \frac{4n_0 |\eta_s|}{|n_0 B + C|^2}, \quad (3)$$

其中, n_0 为入射介质的折射率, 这里我们取 $n_0 = 1$ (空气). 由于基板的后表面有反射, 因此透射率会降低, 必须进行修正. 考虑到基板的厚度比较大, 可以假设基板没有干涉现象, 只有强度叠加, 则

$$T' = \frac{TT_s}{1 - R_s R}, \quad (4)$$

其中, R, T 分别是 (2) 和 (3) 式的结果. R_s, T_s 是半无限基板的反射和透射率^[15,16].

由于只有测量得到的透射率曲线, 因此在计算中必须使用合适的色散模型来拟合透射率曲线才能够得到薄膜材料的光学常数和物理厚度. 在实验过程中, Lorentz-Oscillator 和 Forouhi-Bloomer 模型都被应用于透射率曲线的拟合以比较哪种模型更适用于聚合物太阳能电池的功能层. Lorentz-

Oscillator 模型中, 复介电常数可以表示为^[17]

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \varepsilon_r + i\varepsilon_i \\ &= \varepsilon_\infty \left[1 + \sum_{j=1}^m \frac{A_j^2}{(E_{\text{center}})_j^2 - E(E - i\nu_j)} \right], \end{aligned} \quad (5)$$

这里 ε_r 和 ε_i 分别是该复介电常数的实数部分和虚数部分, E 是光子能量, A_j, ν_j 和 $(E_{\text{center}})_j$ 分别是第 j 个谐振子的振幅, 频率和中心能量. m 是谐振子的数目, 拟合过程中选取 $m = 6$. 求出了薄膜的复介电常数, 材料的折射率 n 和消光系数 k 就可以表示为^[17,18]

$$n = \sqrt{\frac{\sqrt{\varepsilon_r^2 + \varepsilon_i^2} + \varepsilon_r}{2}}, \quad (6)$$

$$k = \sqrt{\frac{\sqrt{\varepsilon_r^2 + \varepsilon_i^2} - \varepsilon_r}{2}}. \quad (7)$$

而在 Forouhi-Bloomer 模型中, 导带与价带被假定为呈抛物线形状, 态密度由能级间的禁带宽度 E_g 表征, 而折射率和消光系数随光子能量不同而变化, 其表达式为

$$n(E) = n(\infty) + \sum_{i=1}^q \frac{B_{0i}E + C_{0i}}{E^2 - B_iE + C_i}; \quad (8)$$

$$k(E) = \sum_{i=1}^q \frac{A_i(E - E_g)^2}{E^2 - B_iE + C_i}; \quad (9)$$

$$B_{0i} = \frac{A_i}{Q_i} \left[\frac{-B_i^2}{2} + E_g B_i - E_g^2 + C_i \right],$$

$$C_{0i} = \frac{A_i}{Q_i} \left[(E_g^2 + C_i) \frac{B_i}{2} - 2E_g C_i \right],$$

$$Q_i = \frac{(4C_i - B_i^2)^{1/2}}{2}. \quad (10)$$

除了用于表征材料在高能级处的折射率的 $n(\infty)$, 其他的几个参数均和材料的电学结构相关. q 为所取的方程式的阶数, 它决定了拟合参数的总数目, 拟合过程中选取 $q = 5$ ^[14-16].

为了评价拟合过程的好坏, 这里还需要一个目标函数来评价拟合得到的透射率曲线与实际观测透射率曲线的偏差程度, 这里取为

$$\text{Merite} = \left\{ \frac{1}{N} \sum \left[\left(\frac{T_{\text{cal}} - T_{\text{exp}}}{T_{\text{exp}}} \right)^2 \right] \right\}^{0.5}, \quad (11)$$

其中, N 是测量点的数目, T_{cal} 和 T_{exp} 分别是计算和测量的透射率值. 目标函数的值越小, 拟合的效果越好. 拟合过程采用全局牛顿法来寻找两个模型

中的各参数的最优值使得评价函数最小, 从而计算出薄膜的光学小数和物理厚度值.

3 实验和结果分析

P3HT/PCBM 与 MEH-PPV/PCBM 体异质结薄膜是目前聚合物太阳能电池研究中应用十分广泛的两种功能层材料. 实验中所使用的薄膜采用溶

液旋涂法制备. 其中溶液质量配比为 P3HT/PCBM: 5/4 (wt%); MEH-PPV/PCBM: 1/4 (wt%), 溶剂均为二氯苯, 两种溶液溶度均为 20 mg/ml. 旋涂时转速为 1000 r/min, 时间为 1 min. 旋涂在玻璃基板上的 P3HT/PCBM 和 MEH-PPV/PCBM 薄膜的透过率曲线采用分光光度计 (岛津 UV310) 获得, 波长范围为 400—780 nm, 测试间隔为 1 nm. 同时利用表面轮廓仪 (Delttek 3M) 测试薄膜的物理厚度.

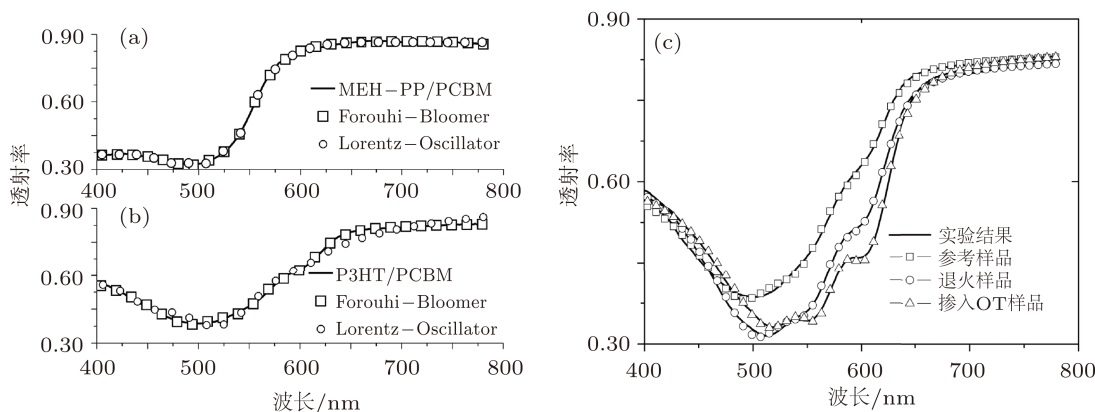


图 1 Forouhi-Bloomer (□) 与 Lorentz-Oscillator (○) 模型拟合计算的 (a)MEH-PPV/PCBM 和 (b) P3HT/PCBM 薄膜透射率曲线; (c) 采用 Forouhi-Bloomer 模型计算的三种条件下 P3HT/PCBM 薄膜透射率曲线 (□: 未处理; ○: 150 °C 退火; △: 添加 OT) 和三种条件下实际的测试曲线 (实线) 从上到下依次是: 未处理; 150 °C 退火; 添加 OT

图 1(a) 和 (b) 是采用 Forouhi-Bloomer 和 Lorentz-Oscillator 模型拟合计算所得到的薄膜透射率曲线与分光光度计测试得到的透射率曲线的对比图. 两种模型拟合的厚度值、评价函数值以及台阶仪测量的物理厚度和误差情况如表 1 所示. 其中, P3HT/PCBM-1: 无处理的 P3HT/PCBM 薄膜; P3HT/PCBM-2: 150 °C 热退火处理的 P3HT/PCBM 薄膜; P3HT/PCBM-3: 添加高沸点溶剂添加剂 1, 8-octanedithiol (OT) 处理后的 P3HT/PCBM 薄膜; d_{fit} : 拟合计算得到的厚度; d_{exp} : 台阶仪测试得到的厚度值; Merite: 拟合计算的目标函数值; Error: 实际厚度与拟合厚度的误差值; I_{sc} : 以相应体异质结为功能层的电池器件的短路电流密度. 在理论

上两种模型都满足 Kramers-Krong 关系, 适用于半导体材料吸收带的色散关系模拟^[14-17], 但对于本文中测试的两种聚合物太阳能电池的功能层, Lorentz-Oscillator 模型得到的结果与其他测试结果偏差较大, 得到评价函数值和误差值都要远差于 Forouhi-Bloomer 模型. 这可能是由于聚合物太阳能电池薄膜在可见区域的透射率曲线不符合 Lorentz-Oscillator 模型, 拟合时拟合参数的随机性太大, 并不容易寻找到合适的参数值. 因此我们在接下来的工作中都采用 Forouhi-Bloomer 模型来进行分析. 图 1 (c) 中, 利用 Forouhi-Bloomer 研究了三种不同条件下的 P3HT/PCBM 薄膜的透射特性, 并与实际测量曲线的比较.

表 1 用 Forouhi-Bloomer (FB) 和 Lorentz-Oscillator (LO) 模型拟合计算与实验比较结果

	d_{fit}/nm		Merite /%		d_{exp}/nm	Error/%		$I_{sc}/(mA/cm^2)$
	FB	LO	FB	LO		FB	LO	
MEH-PPV/PCBM	140.10	160.83	3.29	4.58	145.2	3.5	10.8	3.534
P3HT/PCBM-1	83.09	89.83	5.35	20.32	80.4	3.3	11.7	4.392
P3HT/PCBM-2	101.83	110.34	4.78	21.18	103.5	1.6	6.6	7.809
P3HT/PCBM-3	83.90	92.40	5.69	18.91	81.1	3.8	13.9	8.064

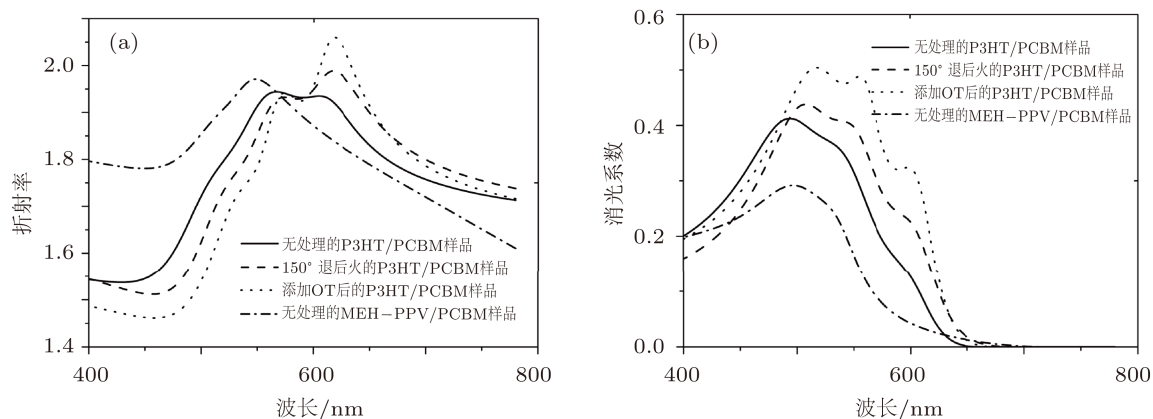


图2 (a) Forouhi-Bloomer 模型计算得到的四种不同体异质结的折射率曲线; (b) 计算得到的四种不同体异质结的消光系数曲线

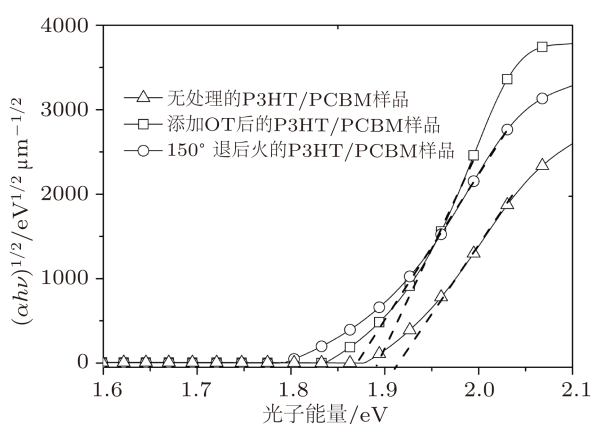


图3 三种体异质结的吸收系数与光子能量的关系图

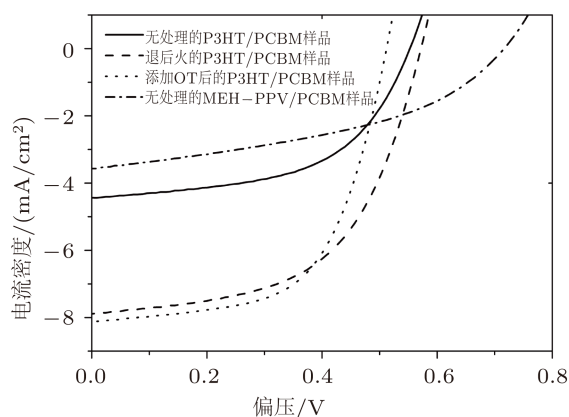


图4 四种体异质结为功能层的聚合物太阳能电池的伏安特性曲线

聚合物太阳能电池作为光电转化的器件,其功能层薄膜的光吸收能力非常重要^[9,10].而薄膜的光吸收系数正比于薄膜的折射率与消光系数的乘积.图2(a)为通过 Forouhi-Bloomer 模型拟合计算得到的 MEH-PPV/PCBM 和 P3HT/PCBM 两种不同体异质结薄膜的折射率和消光系数曲线.其中,未经过优化处理的 MEH-PPV/PCBM 与 P3HT/PCBM 薄

膜的折射率峰值 1.97 和 1.94, 分别出现在 550 nm 和 560 nm. 这与文献中报道的数值相近^[19,20]. 图2为拟合计算中同时得到两者的折射率和消光系数曲线, MEH-PPV/PCBM 的折射率和消光系数在可见光区域内的平均值要低于 P3HT/PCBM, 说明前者的在可见光波段的光吸收能力要弱于后者. 这与表1所示的两种电池的电流密度大小结果相符, 说明模拟计算得到的光学常数与实际情况相符.

对于同一种聚合物太阳能电池功能层材料, 可以通过不同的处理方法来改进其性能^[1,2]. 其中热退火和加入高沸点溶剂添加剂是聚合物太阳能功能层的两种常用的优化方法, 研究表明它们可以有效地提高体异质结内聚合物材料的结晶程度, 使体异质结内的聚合物大分子形成纤维网状的结构从而改善了器件内的载流子传输速率, 优化器件的电学性能^[3,4], 然而这两种器件处理方法对器件的光吸收能力的影响却罕有提及. 这里通过先前的拟合计算方法分析了热退火和加入高沸点添加剂对器件光学常数的影响. 实验中两种处理的条件分别是: 1) 热退火温度为 150 °C, 时间为 5 min; 2) 所用添加助剂为 OT (实验证明这种高沸点的添加助剂有利于 P3HT 的结晶^[3]), 在混合溶液中材料浓度为 20 mg/ml. 如图2(a)和(b)所示, 拟合计算的结果显示薄膜的折射率和消光系数曲线的极大值点所在的波长范围相比于未处理的薄膜要增大许多, 而且数值要比未处理的薄膜提高许多. 薄膜的光学禁带宽度是衡量薄膜光吸收能力的一个重要参数, 其大小可以通过薄膜的消光系数曲线计算得到. 有机半导体的能带结构与普通的无机半导体的价带结构有许多相似^[14,21]. 在半导体的高吸收区域(吸收系数 $\alpha > 10^4 \text{ cm}^{-1}$), 其吸收系数与光子能量满足

$$\alpha h\nu = G(h\nu - E_g^0)^m,$$

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda}, \quad (12)$$

其中, E_g^0 是光学禁带宽度, $h\nu$ 是光子能量, α 是吸收系数, k 是消光系数. 指数 m 的值取决于材料跃迁的性质, 其中 $m = 1/2, 2$ 分别为直接带隙跃迁和非直接带隙跃迁时相应的指数值. 如图 3 所示, 对于 P3HT/PCBM 薄膜, 当 $m = 2$ 时, 吸收能量 $(\alpha h\nu)^2$ 和入射光子能量 $h\nu$ 在短波区域两者的线性关系较好. 这说明功能层的特性与非直接带隙跃迁的半导体材料相近, 这与该功能层由两种有机半导体材料共混, 能级情况较为杂乱相符. 这里选择曲线的线性区域并外推曲线可得: 经过热退火后的薄膜的光学禁带宽度值为 1.88 eV, 添加高沸点的溶剂处理后的薄膜的光学禁带宽度为 1.86 eV, 均小于未处理时的功能层的光学禁带宽度值 1.92 eV. 这可能是由于这两种处理方式都会改善 P3HT 的结晶程度, P3HT 分子规整度的提高引起分子间作用力增大, 在一定程度上提高共轭体系, 从而使吸收红移. 为了验证该拟合计算方法得到的光学常数的准确性, 实验中制作了以这四种体异质结为功能层的聚合物太阳能电池. 的短路电流密度值如表 1 所示, 图 4 为对应的伏安特性曲线. 使用 MEH-PPV/PCBM 薄膜为功能层的太阳能电池能量转化效率低于 P3HT/PCBM 电池的短路电流密度值, 经过两种优化处理后的 P3HT/PCBM 的电池效率明显提高, 而热退火和添加高沸点溶剂添加剂后器件的短路电流密度值相当, 后者的短路电流密度

略高于前者. 这些结果与前文利用透射率拟合计算出的功能层的光学常数及其分析结果相符, 充分说明了使用 Forouhi-Bloomer 模型拟合计算薄膜透射率曲线的方法可以得到比较准确的光学常数值.

4 结论

本文介绍了一种通过测量透射率曲线来研究聚合物太阳能电池功能层的光学常数和物理厚度的方法. 实验中比较了 Forouhi-Bloomer 和 Lorentz-Oscillator 两种色散模型在聚合物太阳能电池功能层光学常数与物理厚度拟合计算中的适用性, 其中 Forouhi-Bloomer 模型对两种常用聚合物太阳能电池的功能层 MEH-PPV/PCBM 和 P3HT/PCBM 薄膜的拟合结果与台阶仪的测量结果符合得较好, 误差小于 4%. 通过该模型的拟合计算分析了热处理和加入高沸点溶剂添加剂等常用优化处理手段对 P3HT/PCBM 体异质结的光学常数和光吸收能力的影响. 所得到的光学常数和光学禁带宽度值与相应电池器件的伏安特性曲线符合, 从而证明了拟合出的光学常数的准确性. 该方法适用于几种有机半导体材料共混的体异质结薄膜, 可以计算厚度值很小的薄膜以及多层薄膜, 很容易推广到其他聚合物太阳能电池的功能层材料的研究中. 由于可以无接触地测量薄膜的光学常数和物理厚度, 可以用于聚合物太阳能电池工业生产中的监控, 并实时分析其物理特性, 对于聚合物太阳能电池的实用化具有重要意义.

- [1] Oosterhout S D, Wienk M M, van Bavel S S, Thiedmann R, Koster L J A, Gilot J, Loos J, Schmidt V, Janssen R A J 2011 *Nature Materials* **8** 818
- [2] Chen H Y, Hou J H, Zhang S Q, Liang Y Y, Yang G W, Yang Y, Yu L P, Wu Y, Li G 2009 *Nature Photonics* **3** 649
- [3] Chen H Y, Yang H C, Yang G W, Sista S, Zadayan R, Li G, Yang Y 2009 *J. Phys. Chem. C* **113** 7946
- [4] van Bavel S S, Sourty E, de With G, Loos J 2009 *Nano Lett.* **9** 507
- [5] Miao X, Peng J B 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2131 (in Chinese) [徐苗, 彭俊彪 2010 物理学报 **59** 2131]
- [6] Yu H Z, Wen Y X 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 038401 (in Chinese) [於黄忠, 温源鑫 2011 物理学报 **60** 038401]
- [7] Li R H, Meng W M, Peng Y Q, Ma C Z, Wang R S, Xie H W, Wang Y, Ye Z C 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2126 (in Chinese) [李荣华, 孟卫民, 彭应全, 马朝柱, 汪润生, 谢宏伟, 王颖, 叶早晨 2010 物理学报 **59** 2126]
- [8] Liu R, Xu S, Zhao S L, Zhang F J, Cao X N, Kong C, Cao W Z, Gong W 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 058801 (in Chinese) [刘瑞, 徐征, 赵谔玲, 张福俊, 曹晓宁, 孔超, 曹文喆, 龚伟 2011 物理学报 **60** 058801]
- [9] Zhao D W, Tan S T, Ke L, Liu P, Kyaw A K K, Sun X W, Lo G Q, Kwong D L 2010 *Solar Energy Materials & Solar Cells* **94** 985
- [10] Kim J Y, Kim S H, Lee H H, Lee K, Ma W L, Gong X, Heeger A L 2006 *Adv. Mater* **18** 572
- [11] Persson N K, 2005 *J. Chem. Phys.* **123** 204718
- [12] Mariano C Q, Heliotis G, Xia R, Ariu M, Pintani M, Etchegoin P, Bradley D D C 2005 *Adv. Funct Mater* **15** 925
- [13] Weber J W, Calado V E, van de Sanden M C M 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 091904
- [14] Macleod H A 2001 *Thin-Film Optical Filters* 3rd edn (Bristol: Institute of Physics Publishing) p34
- [15] Zhu D X, Shen W D, Ye H, Liu X, Zhen H Y 2008 *J. Phys. D:*

- Appl. Phys.* **41** 235104
- [16] Shen W D, Liu X, Zhu Y, Zou T, Ye H, Gu P F 2005 *Chinese Journal of Semiconductors* **26** 155 (in Chinese) [沈伟东, 刘旭, 朱勇, 邹桐, 叶辉, 顾培夫 2005 半导体学报 **26** 155]
- [17] Su W T, Li B, Liu D q, Zhang F S 2006 *Optical Instruments* **28** 150 (in Chinese) [苏伟涛, 李斌, 刘定权, 张凤山 2006 光学仪器 **28** 150]
- [18] Laidani N, Bartali R, Gottardi G, Anderle M, Cheyssac P 2008 *J. Phys.: Condens Matter* **20** 015216
- [19] Moulé A J, Meerholz K 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 061901
- [20] Moulé A J, Bonekamp J B, Meerholz K 2006 *J. Appl. Phys.* **100** 094503
- [21] Koster L J A, Smits E C P, Mihailetchi V D, Blom P W M 2005 *Physical Review B* **72** 085205

Determination of optical constants and thickness of photoactive layer in polymer oslar cells by single transmission measurement*

Huang Zhuo-Yin Li Guo-Long Li Kan Zhen Hong-Yu[†] Shen Wei-Dong
Liu Xiang-Dong Liu Xu

(State Key Labs of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

(Received 2 June 2011; revised manuscript received 24 June 2011)

Abstract

We present a simple and accurate method of determining the optical constant and physical thickness of the photoactive layer in a polymer solar cell. The applicabilities of the physics models including Forouhi-Bloomer and Lorentz-Oscillator models in transmission curve fitting are compared. This method is used to calculate the optical constants and film thicknesses of poly(3-hexylthiophene) (P3HT)/[6,6]-phenyl C₆₁-butyric acid methyl ester (PCBM) and poly[2-methoxy-5-(2'-ethyl-hexyloxy)-1,4-phenylenevinylene](MEH-PPV)/PCBM bulk heterojunction. The calculated transmission curves fit to the experimental ones well. The results accord with those reported in the literature and from the step profiler, and their error is less than 4%. The optical constant and the physical thickness of polymer solar cell after the optimization process including thermal annealing and adding high-boiling-point additive are studied, and the results are consistent with the voltage-current characteristics of the cell. This method is suited for bulk heterojunction films and can be used in polymer solar cell optimization and detection system.

Keywords: polymer solar cells, optical constants, transmission curve, Forouhi-Bloomer model

PACS: 88.40.jr, 82.35.Cd, 78.66.-w

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61007056), the Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20100101120048), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant Nos. 2009QNA5010, 2010QNA6003).

[†] E-mail: hongyuzhen@zju.edu.cn