

doi:10.3788/gzxb20184708.0823003

利用叠层一维光子晶体调控半透明有机太阳能电池的性能

梁文跃^{1,2}, 钟锦耀¹, 徐海涛¹, 邓海东¹, 王奇生², 龙拥兵¹

(1 华南农业大学 电子工程学院, 广州 510642)

(2 五邑大学 数学与计算科学学院, 广东 江门 529020)

摘 要: 利用叠层一维光子晶体提高半透明有机太阳能电池的光电转换效率和调控器件的透视颜色. 采用传输矩阵法计算了基于叠层一维光子晶体的半透明有机太阳能电池中活性层的吸收光谱和器件的透过率光谱, 进而计算了器件的光电转换效率和透视颜色. 研究表明, 通过合理设计叠层一维光子晶体中顶光子晶体和底光子晶体的禁带中心波长, 可以将器件的光电转换效率提高 24.4%. 此外, 通过控制顶光子晶体和底光子晶体的禁带中心波长, 可以调控半透明有机太阳能电池的透视颜色, 获得透视颜色分别为蓝色、绿色和红色的半透明电池器件. 与单层一维光子晶体相比, 叠层一维光子晶体可以使器件获得更高的光电转换效率, 并能在更大光谱范围内调控器件的透视颜色.

关键词: 有机太阳能电池; 光子晶体; 半透明; 光电转换效率; 透视颜色

中图分类号: O431

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)08-0823003-8

Tailoring the Performance of Semitransparent Organic Solar Cells by Tandem One-dimensional Photonic Crystals

LIANG Wen-yue^{1,2}, ZHONG Jin-yao², XU Hai-tao²,
DENG Hai-dong², WANG Qi-sheng¹, LONG Yong-bing²

(1 School of Electronic Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

(2 School of Mathematics and Computational Science, Wuyi University, Jiangmen, Guangdong 529020, China)

Abstract: Tandem One-Dimensional Photonic Crystals (1DPCs) are employed to improve the photovoltaic conversion efficiency of the semitransparent organic solar cells and tailor the see-through colors of the devices. Transfer matrix method is employed to calculate the absorption in the active layer and transmission spectra of the devices. With these calculated data as inputs, the photovoltaic conversion efficiency and the see-through colors are calculated. It is revealed that an improvement of 24.4% in the photovoltaic conversion efficiency is achieved by tailoring the center wavelength of the bandgap of the top 1DPCs and bottom 1DPCs in the tandem 1DPCs. In addition, the see-through colors of the device can be tuned by tailoring the center wavelength of the bandgap of the top 1DPCs and bottom 1DPCs. Correspondingly, semitransparent organic solar cells with different see-through colors such as blue, green and red can be obtained. Compared with the single 1DPCs, tandem 1DPCs can lead to higher improvement in PCE and broader tunable range of the see-through color of the devices.

Key words: Organic solar cell; Photonic crystals; Semitransparent; Photovoltaic conversion efficiency;

基金项目: 广东省自然科学基金杰出青年基金(No. 2014A030306005), 国家自然科学基金(No. 11774099), 广东省高层次人才计划项目(Nos. Yue Cai-Jiao [2013]246, Jiang Cai-Jiao[2014]10), 广东省自然科学基金(No. 2016A03031339), 广州市科技计划项目(No. 201607010176)资助

第一作者: 梁文跃(1992-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为有机太阳能电池. Email: wenyueyue1992@gmail.com

导师(通讯作者): 龙拥兵(1979-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为有机太阳能电池, 纳米光子学. Email: yongbinglong@126.com

收稿日期: 2018-01-19; **录用日期:** 2018-05-25

<http://www.photon.ac.cn>

See-through color

OCIS Codes: 230.5298; 160.4890; 160.5298; 230.0250; 350.6050

0 引言

半透明有机太阳能电池可被集成到玻璃上,制备既具有光伏发电功能又在特定可见光波段透明的光伏玻璃.这种玻璃在光伏半透明彩色窗户、光伏建筑一体化和光伏汽车玻璃等领域具有广泛的应用前景,半透明有机太阳能电池也因此成为光伏领域中一个新的研究热点^[1-14].自2006年BAILEY-SALZMAN R F等首次报导了半透明有机太阳能电池以来^[1],科研工作者投入了巨大的精力来优化半透明有机太阳能电池的光电转换效率、透明度以及色度学性能,如:透视颜色(透过率光谱所对应的颜色)、显色指数等^[2-8].目前,通过采用非富勒烯受体材料,半透明有机太阳能电池的光电转换效率已经超过10%^[3].

尽管半透明电池器件的效率获得了很大的提高,但是这些器件的透视颜色通常为无色.为了获得不同透视颜色的彩色半透明有机太阳能电池,通常采用两种方法,第一,采用具有不同吸收光谱的有机物做活性层^[6-9];第二,利用单层一维光子晶体、减反层等光学结构调节半透明有机太阳能电池的透过率光谱,进而获得透视颜色不同的半透明有机太阳能电池^[10-14].XU C等利用MoO₃和LiF两层薄膜周期性排列制备一维光子晶体,并在此基础上制作了基于一维光子晶体的半透明有机太阳能电池,器件的效率达到7%,同时器件的透视颜色可以在红色和中性颜色范围内调节^[13].尽管利用这些方法实现了对半透明有机太阳能电池透过率光谱和透视颜色的调控,但是其调控能力有限.以单层一维光子晶体为例,目前在有机太阳能电池中,通常采用WO₃、TiO₂、MoO₃等高折射率材料和LiF、SiO₂等低折射率材料来构建一维光子晶体^[10-13].然而,这两类材料的折射率相差较小,相应的光子晶体的禁带宽度较小,进而限制了器件效率的提高以及器件透过率光谱调节的范围,利用这一方法通常也很难获得透视颜色为绿色的半透明太阳能电池.

针对上述问题,本文将两个单层一维光子晶体(single One-Dimensional Photonic Crystals, single 1DPCs)叠加构成叠层一维光子晶体(tandem 1DPCs),利用叠层一维光子晶体来调节半透明有机太阳能电池的性能.研究表明,利用叠层一维光子晶体可将半透明有机太阳能电池的光电转换效率提高24.4%,其提高率优于单层一维光子晶体.此外,利用叠层一维光子晶体可以在更大范围内调节半透明有机太阳能电池的色度学性能,进而获得透视颜色分别为红色、绿色和蓝色的半透明电池器件.

1 器件结构与理论模型

1.1 器件结构和设计原理

本文研究的半透明有机太阳能电池的结构为玻璃基底/透明电极/电子传输层/活性层/空穴传输层/Ag透明电极/叠层一维光子晶体,如图1所示.其中,透明电极为Indium Tin Oxide (ITO)电极,厚度为100 nm;电子传输层(Electron Transport Layer, ETL)为[9,9-二(3'-(N,N-二甲氨基)丙基)-2,7-芴]-交-2,7-(9,9-二辛基芴)](PFN),厚度为10 nm;活性层(active layer)为聚噻吩并[3,4-b]噻吩/苯并二噻吩(PTB7)和[6,6]-苯基C71丁酸甲酯(PC₇₁BM)混合物,厚度为80 nm;空穴传输层(Hole Transport Layer, ETL)为MoO₃,厚度为10 nm;Ag透明电极的厚度为10 nm.

在太阳能电池器件中,叠层一维光子晶体由两个单层一维光子晶体重叠构成,分别称为顶光子晶体和底光子晶体.顶光子晶体和底光子晶体均由5对SiO₂薄膜和TiO₂薄膜周期性排列而成,结构为(SiO₂/TiO₂)⁵;其禁带中心波长分别为 λ_{01} 和 λ_{02} ,SiO₂和TiO₂薄膜的厚度由 $\lambda_0/4n$ 计算得到^[11-13,15], λ_0 为顶光子晶体或者底光子晶体的禁带中心波长, n 为SiO₂和TiO₂的折射率.在两个单层一维光子晶体禁带所在的波段,叠层一维光子晶体的反射率高,可提高活性层的吸光效率和器件的光电转换效率;因此通过合理设置两个单层一维光子晶体的禁带中心波长,可以控制两个光子晶体禁带所在的位置和叠层一维光子晶体禁带的总宽度,进而最大限度的提高器件的光电转换效率.而在两个一维光子晶体通带重叠的波段,叠层一维光子晶体的透过率较高,器件具有较高的透明度;通过合理设置两个单层一维光子晶体的禁带中心波长,控制两个光子晶体通带重叠的波段,进而调控叠层一维光子晶体的透光波段,最终实现对半透明有机太阳能电池透视颜色的调控.本论文模拟过程中, SiO₂、TiO₂、ITO、Ag、PFN、PTB7、PC₇₁BM的折射率均采用参考文献测量结果^[16-19].

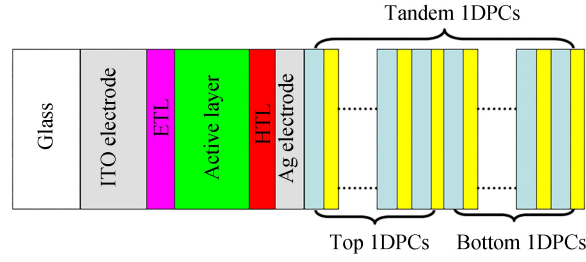


图1 基于叠层一维光子晶体的半透明有机太阳能电池的结构

Fig.1 Configuration of the semitransparent organic solar cells based on tandem one-dimensional photonic crystals

1.2 计算模型

利用传输矩阵法计算半透明有机太阳能电池器件内部的光电场分布,然后利用式(1)计算活性层的吸光效率^[8-20].

$$A(\lambda) = \frac{1}{I(\lambda)} \int_{x \in \text{layer}} \frac{2\pi c \epsilon_0 k n |\mathbf{E}(x)|^2}{\lambda} dx \quad (1)$$

式中, $\mathbf{E}(x)$ 为器件内部的电场; n 和 k 分别为活性层的折射率和消光系数; c 为光速; ϵ_0 为真空中的介电常数; λ 为入射光的波长; $I(\lambda)$ 为入射光的强度.

假如活性层吸收的所有光子都能转换成光电流,即内部量子效率为1,则器件的短路电流表示为^[18-20]

$$J_{sc} = \int \frac{A(\lambda)I(\lambda)}{hc} \lambda q d\lambda \quad (2)$$

式中, h 为普朗克常数, q 为电子的电量.根据计算得到的短路电流,器件的光电转换效率可表示为

$$\text{PCE} = \frac{J_{sc} V_{oc} \text{FF}}{P_{in}} \quad (3)$$

式中, V_{oc} 和FF为器件的开路电压和填充因子.计算中,为了估算器件的光电转换效率, V_{oc} 和FF的值分别设为0.75 V和0.70^[17].

为了研究半透明太阳能电池的透视颜色,首先利用传输矩阵法计算器件的透过率光谱 $T(\lambda)$,然后根据透过率光谱计算三刺激值^[21]

$$X = \int_{360}^{800} I(\lambda) \times \bar{x}(\lambda) \times T(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

$$Y = \int_{360}^{800} I(\lambda) \times \bar{y}(\lambda) \times T(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

$$Z = \int_{360}^{800} I(\lambda) \times \bar{z}(\lambda) \times T(\lambda) d\lambda \quad (6)$$

式中 $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ 为颜色匹配函数.器件透过率光谱所对应的色坐标为

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad (7)$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad (8)$$

2 结果与讨论

2.1 利用叠层一维光子晶体提高半透明有机太阳能电池的光电转换效率

首先研究叠层一维光子晶体中顶光子晶体禁带中心波长(λ_{01})对器件光电转换效率的影响.计算过程中,底光子晶体的禁带中心波长(λ_{02})被设为固定值700 nm, λ_{01} 从400 nm增加到800 nm,顶光子晶体和底光子晶体中 SiO_2 和 TiO_2 薄膜的厚度分别由 $\lambda_{01}/4n$ 或者 $\lambda_{02}/4n$ 计算得到, n 为 SiO_2 和 TiO_2 薄膜的折射率,计算结果如图2和表1所示.计算结果表明,当底光子晶体的禁带中心位置位于480 nm时(称为器件1),器件光电转换效率达到最高值,约7.8%;与不包含叠层一维光子晶体的半透明有机太阳能电池(称为器件2)相比,其光电转换效率提高了24.4%.

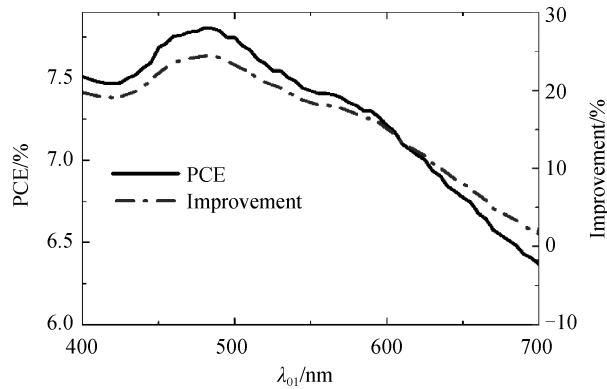


图2 顶一维光子晶体的禁带中心波长(λ_{01})对器件光电转换效率和光电转换效率提高率的影响
Fig.2 The effects of bandgap center wavelength(λ_{01}) of the top 1DPCs in tandem 1DPCs on the PCE and PCE improvement of devices

表1 基于叠层/单层一维光子晶体的半透明有机太阳能电池器件性能对比

Table 1 Comparison of semitransparent organic solar cells with single and tandem 1DPCs

| Device | 1DPCs | λ_{01}/nm | λ_{02}/nm | Efficiency | Improvement/ $\%^*$ |
|----------|--------------|--------------------------|--------------------------|------------|---------------------|
| Device 1 | Tandem 1DPCs | 480 | 700 | 7.8 | 24.4 |
| Device 2 | - | - | - | 6.27 | - |
| Device 3 | Single 1DPCs | 480 | - | 7.38 | 17.7 |
| Device 4 | Single 1DPCs | 700 | - | 6.36 | 1.4 |

* Improvement of the efficiency when compared with that of device 2

为了分析叠层一维光子晶体能够提高器件光电转换效率的原因,本文计算了器件1和器件2中活性层的吸收光谱和光电场分布,分别如图3和图4所示.由图3(a)可以看出,当入射光波长在450~620 nm, 635~745 nm范围内时,基于叠层一维光子晶体的器件1的吸收光谱明显高于器件2.这主要原因在于,禁带中心波长为480 nm的顶光子晶体在430~595 nm之间具有较高的反射率,而禁带中心波长为700 nm的底光子晶体在595~800 nm之间具有较高的反射率,如图3(b)所示;两光子晶体叠加构成叠层一维光子晶体后,在450~800 nm之间具有较高反射率,大部分波段超过90%,能够将该波段的入射光反射回电池器件内部,并与入射光产生干涉,进而提高活性层内部的电场.如图4所示,当入射光波长在450~620 nm和635~745 nm两个波段,器件1中活性层内部的电场明显高于器件2.随着器件内部电场的增强,活性层在该两个波段的吸光能力获得明显增强,进而提高器件1的光电转换效率.

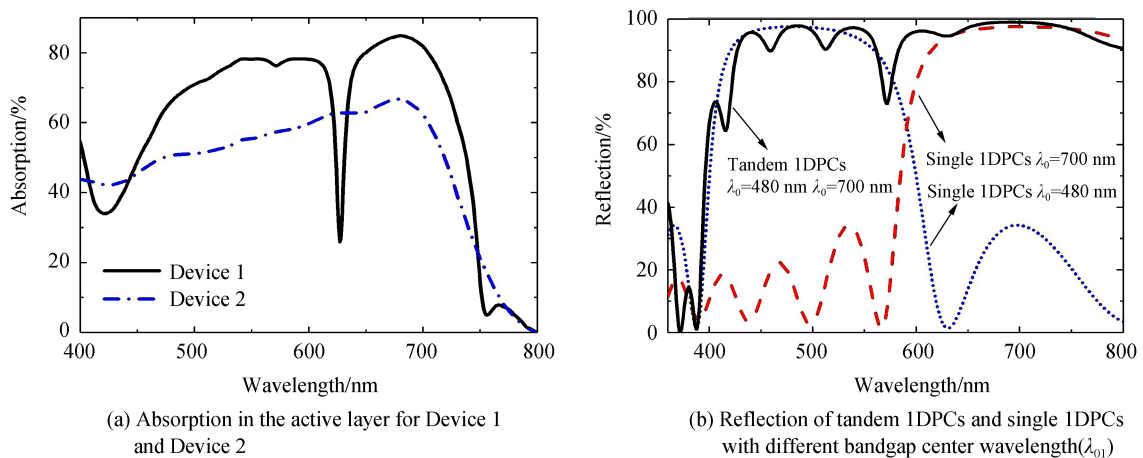


图3 叠层一维光子晶体对器件活性层吸收光谱的影响
Fig.3 The effects of the tandem 1DPCs on absorption in the active layer for the devices

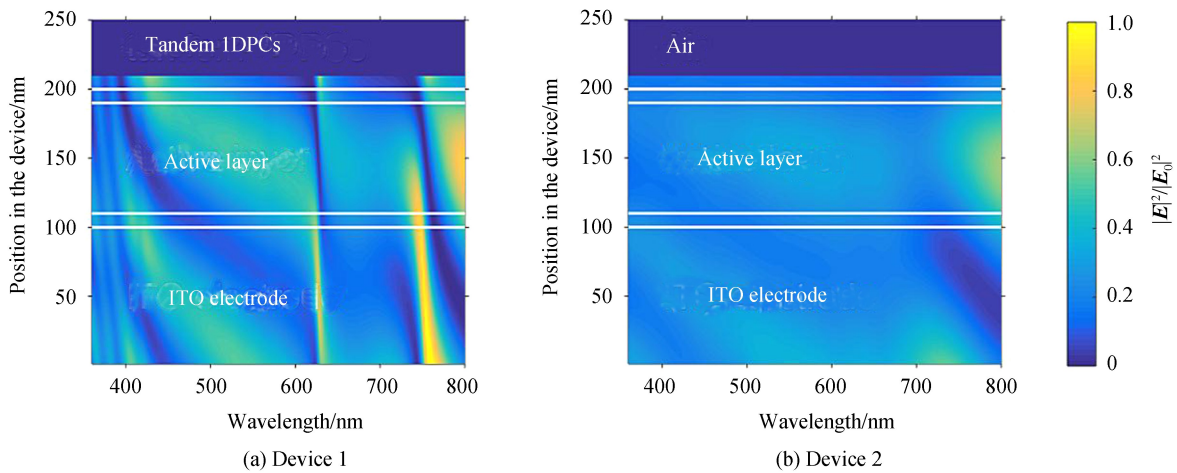


图4 器件1和器件2内部电场强度分布
Fig.4 Electric intensity distribution in Device1 and Device2

本文进一步研究了叠层一维光子晶体中底光子晶体的禁带中心波长(λ_{01})对半透明电池器件光电转换效率的影响.研究过程中, λ_{01} 设为400~800 nm的某一固定值,对每一固定波长的 λ_{01} , λ_{02} 从400 nm增加到800 nm,计算结果如图5.从图5可以看出,随着 λ_{02} 的改变,在区域A($400 \text{ nm} < \lambda_{01} < 520 \text{ nm}$, $550 \text{ nm} < \lambda_{02} < 800 \text{ nm}$,圆点所在区域)和在区域B($530 \text{ nm} < \lambda_{01} < 620 \text{ nm}$, $400 \text{ nm} < \lambda_{02} < 500 \text{ nm}$,圆点所在区域),器件的光电转换效率大于7.6%.与不含叠层一维光子晶体的器件2相比,这一效率提高了21.2%.这表明,通过合理设计叠层一维光子晶体中顶光子晶体和底光子晶体的禁带中心波长,可以获得较高效率的半透明有机太阳能电池.

最后,对比研究叠层一维光子晶体和单层一维光子晶体对半透明太阳能电池性能的影响.研究过程中,计算了基于单层一维光子晶体的电池器件的光电转换效率.其结构为:玻璃基底/透明电极(100 nm)/电子传输层(10 nm)/活性层(80 nm)/空穴传输层(10 nm)/金属透明电极(10 nm)/单层一维光子晶体.透明电极、电子传输层、活性层、空穴传输层、金属透明电极的厚度参数与器件1一致;单层一维光子晶体的禁带中心波长分别为480 nm(器件3)和700 nm(器件4),计算结果如表1所示.结果表明,禁带中心波长在480 nm和禁带中心波长在700 nm的单层一维光子晶体可以使器件的光电转换效率提高17.7%和1.4%.将两者叠加成叠层一维光子晶体后,可将器件的光电转换效率进一步提高24.4%.这一研究结果表明,叠层一维光子晶体对光电转换效率的提高程度优于单层一维光子晶体.

2.2 利用叠层一维光子晶体调节半透明有机太阳能电池的透视颜色

研究叠层一维光子晶体对半透明有机太阳能电池透视颜色的影响.叠层一维光子晶体中底光子晶体的禁带中心波长(λ_{02})设置为760 nm,650 nm和580 nm,顶光子晶体的禁带中心波长(λ_{01})从360 nm增加到800 nm.顶光子晶体和底光子晶体中各层薄膜的厚度分别由 $\lambda_{01}/4n$ 或者 $\lambda_{02}/4n$ 计算得到, n 为 TiO_2 或者 SiO_2 的折射率.为了计算器件透过光谱所对应的颜色,首先利用传输矩阵法计算器件的透过率光谱 $T(\lambda)$,然后根据式(4)~(8)计算器件透过率光谱对应的色坐标(x, y).为了对比,本文计算了基于单层一维光子晶体的半透明太阳能电池的透视颜色,计算结果如图6(a),其中星号对应的 λ_{01} 为360 nm.从图6(a)可以看出,在基于单层一维光子晶体的半透明有机太阳能电池中,随着禁带中心波长从360 nm增加到800 nm,器件的透视颜色从橙色变为红色,然后变为紫色、蓝色和无色;但是,在禁带中心波长变化过程中,器件透视颜色未出现绿色,这表明利用单层一维光子晶体无法获得透视颜色为绿色的半透明有机太阳能电池.

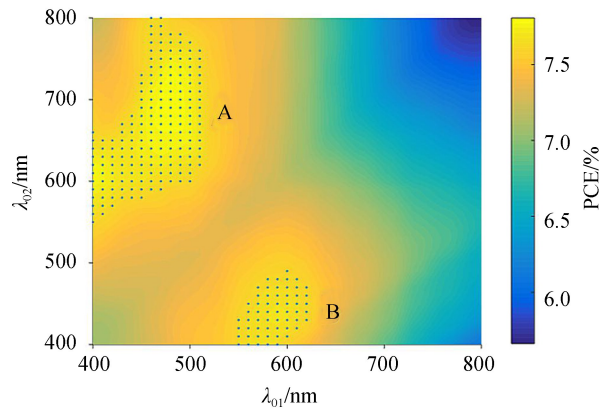


图5 叠层一维光子晶体中顶光子晶体和底光子晶体禁带中心波长对器件性能的影响

Fig.5 PCE as a function of λ_{01} and λ_{02} for tandem 1DPCs

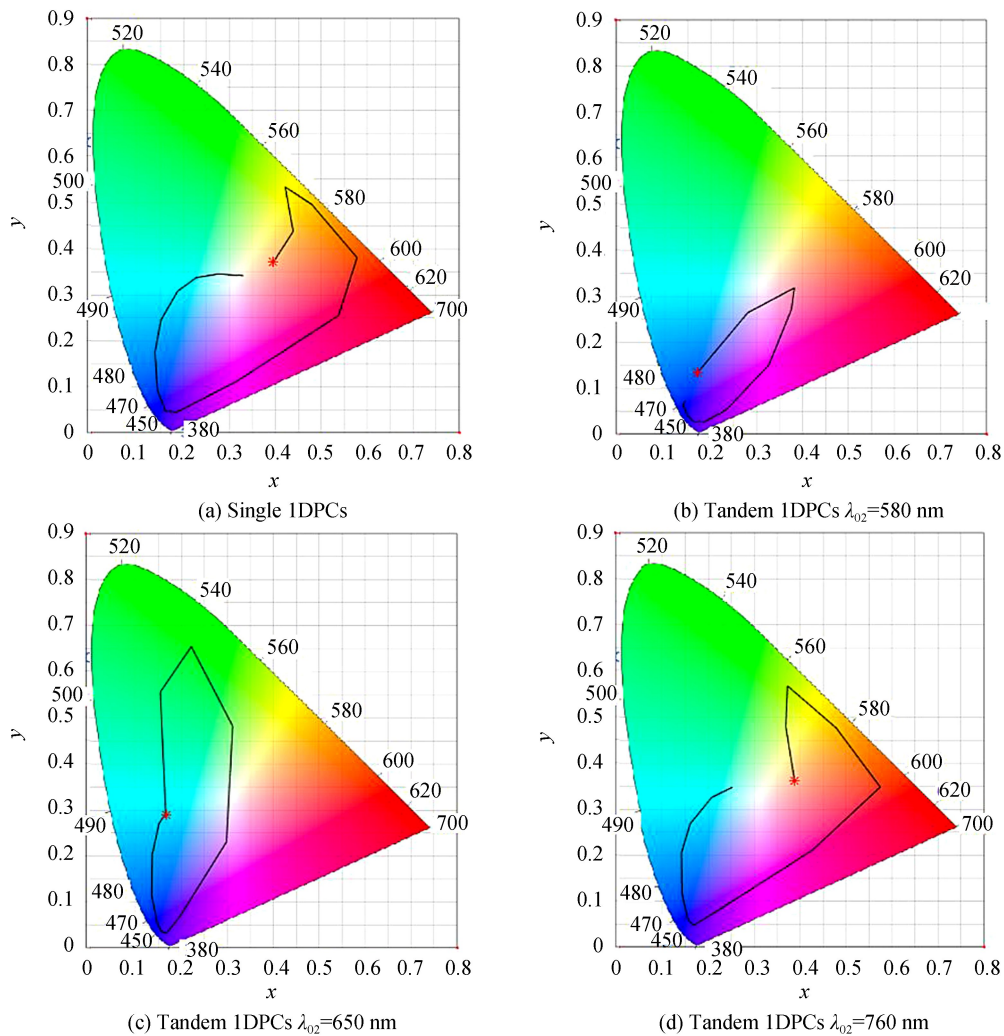


图6 顶光子晶体禁带中心波长对器件透视颜色的影响

Fig.6 The effects of the center wavelength of bandgap of the top photonic crystals

而对于叠层一维光子晶体而言,当选择不同的 λ_{01} 和 λ_{02} ,器件的色坐标可以在较大范围内变化,获得透视颜色分别为蓝色、绿色和红色的电池器件.当 $\lambda_{01}=360\text{ nm}$, $\lambda_{02}=580\text{ nm}$,器件透视颜色为蓝色(器件5);当 $\lambda_{01}=400\text{ nm}$, $\lambda_{02}=650\text{ nm}$,器件透视颜色为绿色(器件6);当 $\lambda_{01}=470\text{ nm}$, $\lambda_{02}=760\text{ nm}$,器件透视颜色为红色(器件7).这三个器件的透过率光谱见图7,主要性能参数见表2.从该表中可以看出,这三个器件的光电转换效率大于7.5%,在透光波段的平均透过率大于30%.这表明,合理调节叠层一维光子晶体的禁带中心波长,可以获得具有较高光电转换效率、较高平均透明度以及透视颜色可调的半透明有机太阳能电池.

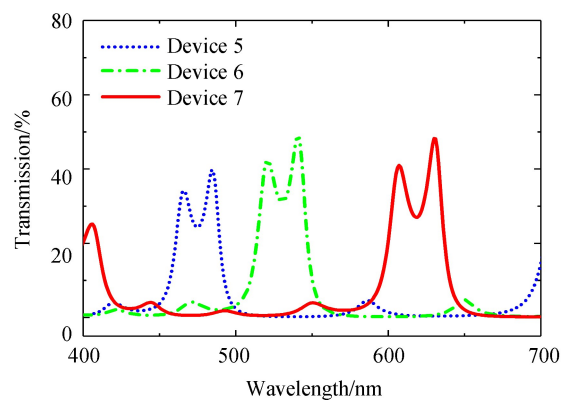


图7 不同透视颜色的半透明有机太阳能电池的透过率光谱

Fig.7 The transmission spectra of the semitransparent organic solar cells with different see-through colors

表 2 不同透视颜色的半透明有机太阳能电池的主要性能参数
 Table 2 Parameters of semitransparent organic solar cells with different see-through colors

| Device | λ_{01}/nm | λ_{02}/nm | PCE/% | Average transmission of transmission window/% | Color coordinates (x, y) |
|----------|--------------------------|--------------------------|-------|---|------------------------------|
| Device 5 | 360 | 560 | 7.54 | 30.0 | (0.13,0.14) |
| Device 6 | 400 | 650 | 7.67 | 36.2 | (0.19,0.67) |
| Device 7 | 460 | 760 | 7.65 | 34.0 | (0.57,0.37) |

3 结论

利用传输矩阵法研究了基于叠层一维光子晶体的半透明有机太阳能电池的性质,研究表明利用叠层一维光子晶体可以将半透明有机太阳能电池的光电转换效率提高 24.4%。同时,利用叠层一维光子晶体可以在较大范围内调节半透明有机太阳能电池的透过率光谱,获得透视颜色分别为蓝色、绿色和红色的半透明电池器件。与单层一维光子晶体相比,利用叠层一维光子晶体可以使半透明有机太阳能电池获得更高的光电转换效率,同时对透视颜色具有更大的调节自由度。本文的研究提供了一种调节和优化半透明有机太阳能电池光学性能的方法,在光伏建筑一体化等领域具有潜在的应用前景。

参考文献

- [1] BAILEY-SALZMAN R F, RAND B P, FORREST S R. Semitransparent organic photovoltaic cells[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **88**(23): 233502.
- [2] TAI Q, YAN F. Emerging semitransparent solar cells: Materials and device design[J]. *Advanced Materials*, 2017, **29**(34):1700192.
- [3] JIA B, DAI S, KE Z, *et al.* Breaking 10% efficiency in semitransparent solar cells with fused-undecacyclic electron acceptor[J]. *Chemistry of Materials*, 2018,**30**(1): 239-245.
- [4] CHUEH C C, CHIEN S C, YIP H L, *et al.* Toward high-performance semi-transparent polymer solar cells: optimization of ultra-thin light absorbing layer and transparent cathode architecture[J]. *Advanced Energy Materials*, 2013, **3**(4): 417-423.
- [5] CHEN K S, SALINAS J F, YIP H L, *et al.* Semi-transparent polymer solar cells with 6% PCE, 25% average visible transmittance and a color rendering index close to 100 for power generating window applications[J]. *Energy & Environmental Science*, 2012, **5**(11): 9551-9557.
- [6] CUI Y, YANG C, YAO H, *et al.* Efficient semitransparent organic solar cells with tunable color enabled by an ultralow-bandgap nonfullerene acceptor[J]. *Advanced Materials*, 2017, **29**(43): 1703080.
- [7] COLSMANN A, PUETZ A, BAUER A, *et al.* Efficient semi-transparent organic solar cells with good transparency color perception and rendering properties[J]. *Advanced Energy Materials*, 2011, **1**(4): 599-603.
- [8] CZOLK J, PUETZ A, KUTSAROV D, *et al.* Inverted semi-transparent polymer solar cells with transparency color rendering indices approaching 100[J]. *Advanced Energy Materials*, 2013, **3**(3): 386-390.
- [9] LIU F, ZHOU Z, ZHANG C, *et al.* Efficient semitransparent solar cells with high NIR responsiveness enabled by a small-bandgap electron acceptor[J]. *Advanced Materials*, 2017, **29**(21): 1606574.
- [10] ZHANG Y, PENGZ, CAI C, *et al.* Colorful semitransparent polymer solar cells employing a bottom periodic one-dimensional photonic crystal and a top conductive PEDOT:PSS layer[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2016, **4**(30): 11821-11828.
- [11] LONG Y. Optimizing one-dimensional photonic-crystals based semitransparent organic solar cells by tailoring reflection phase shift within photonic bandgap[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, **99**(9): 187.
- [12] YU W, SHEN L, LONG Y, *et al.* Semitransparent polymer solar cells with one-dimensional (WO₃/LiF)^N photonic crystals[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, **101**(15): 153307.
- [13] XU G, SHEN L, CUI C, *et al.* High-performance colorful semitransparent polymer solar cells with ultrathin hybrid-metal electrodes and fine-tuned dielectric mirrors[J]. *Advanced Functional Materials*, 2017, **27**(15): 1605908.
- [14] LI F, RUAN S, XU Y, *et al.* Semitransparent inverted polymer solar cells using MoO₃/Ag/WO₃ as highly transparent anodes[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2011, **95**(3): 877-880.
- [15] WU Zhen-hua, LI Si-min, ZHANG Wen-tao, *et al.* Back reflector of solar cells consisting of one-dimensional photonic crystal and double-layered two-dimensional photonic crystal[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **45**(2): 0223003. 武振华, 李思敏, 张文涛, 等. 一维和双层二维光子晶体太阳能电池背反射器[J]. *光子学报*, 2015, **45**(2): 0223003.
- [16] PALIK E D. Handbook of optical constants of solids[M]. Academic Press, 1998.
- [17] HE Z, ZHONG C, SU S, *et al.* Enhanced power-conversion efficiency in polymer solar cells using an inverted device structure[J]. *Nature Photonics*, 2012, **6**(9): 591-595.

- [18] PERSSON N, ARWIN K, H, INGANÄS O. Optical optimization of polyfluorene-fullerene blend photodiodes[J] *Journal of Applied Physics*, 2005, **97**: 034503.
- [19] LONG Y. Effects of metal electrode reflection and layer thicknesses on the performance of inverted organic solar cells [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2010, **94**(5): 744-749.
- [20] LONG Y. Red and near-infrared absorption enhancement for low bandgap polymersolar cells by combining the optical microcavity and optical spacers[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2011, **95**(12): 3400-3407.
- [21] 迟泽英, 陈文建. 应用光学与光学设计基础[M]. 东南大学出版社, 2008.

Foundation item: Guangdong Natural Science Funds for Distinguished Young Scholar (No. 2014A030306005), National Natural Science Foundation of China (No. 11774099), Foundation for High-level Talents in Higher Education of Guangdong Province, China (Nos. Yue Cai-Jiao[2013]246, Jiang Cai-Jiao[2014]10), Natural Science Foundation of Guangdong Province, China (No. 2016A03031339), the Science and Technology Program of Guangzhou (No.201607010176)

引用格式: LIANG Wen-yue, ZHONG Jin-yao, XU Hai-tao, *et al.* Tailoring the Performance of Semitransparent Organic Solar Cells by Tandem One-dimensional Photonic Crystals[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(8): 0823003

梁文跃, 钟锦耀, 徐海涛, 等. 利用叠层一维光子晶体调控半透明有机太阳能电池的性能[J]. 光子学报, 2018, **47**(8): 0823003