

TiO₂ 微粒对远程荧光粉膜及白光发光二极管器件光色性能的影响

卓宁泽 张娜 李博超 李文铨 何清洋 施丰华 朱月华 邢海东 王海波

Investigation of photo-chromic properties of remote phosphor film and white light emitting diode mixed with TiO₂ particles

Zhuo Ning-Ze Zhang Na Li Bo-Chao Li Wen-Quan He Qing-Yang Shi Feng-Hua Zhu Yue-Hua Xing Hai-Dong Wang Hai-Bo

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 058501 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.058501

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.058501>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I5>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

利用单层密排的纳米球提高发光二极管的出光效率

Light-extraction enhancement of GaN-based LEDs by closely-packed nanospheres monolayer

物理学报.2015, 64(14): 148502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.148502>

利用温变电容特性测量发光二极管结温的研究

Junction temperature measurement of light-emitting diodes using temperature-dependent capacitance

物理学报.2015, 64(11): 118501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.118501>

晶圆键合和激光剥离工艺对 GaN 基垂直结构发光二极管芯片残余应力的影响

Effect of wafer bonding and laser liftoff process on residual stress of GaN-based vertical light emitting diode chips

物理学报.2015, 64(2): 028501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.028501>

光致电化学法提高垂直结构发光二极管出光效率的研究

Increase in light extraction efficiency of vertical light emitting diodes by a photo-electro-chemical etching method

物理学报.2015, 64(1): 018501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.018501>

基于反应动力学的 GaN LED 参数退化模型的研究

The investigation of LED degradation model based on the chemical kinetics

物理学报.2013, 62(21): 218503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.218503>

TiO₂微粒对远程荧光粉膜及白光发光二极管器件光色性能的影响*

卓宁泽¹⁾ 张娜¹⁾ 李博超²⁾ 李文铨²⁾ 何清洋²⁾ 施丰华¹⁾ 朱月华¹⁾
邢海东¹⁾ 王海波^{1)†}

1)(南京工业大学电光源材料研究所, 南京 210015)

2)(南京工业大学材料科学与工程学院, 南京 210009)

(2015年11月23日收到; 2015年12月9日收到修改稿)

利用热压法将TiO₂微粒掺入至YAG:Ce荧光粉和硅树脂中制备出远程荧光粉膜并封装成白光发光二极管(LED)器件, 通过荧光粉相对亮度仪、双积分球测试系统和可见光光谱分析系统对样品的光色性能及机理进行了研究. 结果表明: TiO₂的散射效应能够显著提高蓝光的利用率和黄光的透射强度, 白光LED器件的光通量在TiO₂浓度为0.966 g/cm³时达到最高值415.28 lm(@300 mA, 9.3 V), 提高了8.15%, 相关色温从冷白6900 K逐渐变化至暖白3832 K. TiO₂的掺入不仅提高了远程荧光粉膜的发射强度和白光LED器件的光通量, 同时能调控其相关色温.

关键词: TiO₂微粒, 远程荧光粉膜, 白光发光二极管器件, 光通量

PACS: 85.60.Jb, 78.55.-m, 42.25.Fx

DOI: 10.7498/aps.65.058501

1 引言

白光发光二极管(LED)器件由于具有光通量高、环境友好、安全可靠和稳定性高等优点, 从而成为一种非常有前景的照明光源^[1,2]. 目前, 制备白光LED器件的主要方法是利用点胶工艺将YAG:Ce荧光粉直接涂覆在GaN蓝光芯片表面进而封装成型. 这种传统结构存在光通量低、光色均匀性差及荧光粉易受热、衰减快的缺点^[3,4]. 远程荧光粉封装作为一种改善型工艺将荧光粉远离芯片放置, 进而封装成型, 相较于传统封装结构具有光通量高、颜色均匀和稳定性优良的优点. Dong等^[5]通过仿真方法, 研究了基于远程荧光粉封装的白光LED模组, 通过对比得出远程荧光粉封装由于远离芯片而能够明显提高器件的可靠性. Tsai

等^[6]研究发现, 相较于传统点胶封装, 远程荧光粉封装可以提高10%的光效, 提高颜色均匀度, 出光角度也从传统的120°提高到180°, 结温随着注入电流的提高而变化非常小.

鉴于远程荧光粉封装诸多的优点, 其已经得到了广泛的关注和研究. Narendran等^[7]提出一种SPE (scattered photon extraction) 结构, 将荧光粉远离芯片, 利用二次光学设计重复利用反射光, 器件出光效率可以达到81%; Allen和Steckl^[8]则提出了一种内反射增强出光 (enhanced light extraction by internal reflection, ELiXIR) 结构, 利用全反射原理, 器件出光效率可以达到91%; Lin等^[9]开发的一种环形远程荧光粉 (ring remote phosphor, RPP) 结构, 通过引入倒锥形透镜, 出光效率高达94.1%; 2014年, Lin等^[10]又对该结构进行了优化,

* 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2011AA03A107) 和江苏省科技成果转化计划 (批准号: BA2014073) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: Wanghaibo88@163.com

通过引入梯度表面, 实现了蓝光泄露的控制和光色均匀度的提高; Xiao等^[11]在远程荧光粉膜和光源间加入一层散光片, 并优化相对位置, 将朗伯体光线改变方向激发膜样品, 实现了在350 mA电流下光效率从145 lm/W提高到162.3 lm/W, 但由于远程荧光粉结构使用荧光粉较多, 提升光通量和相关色温的调控需要依赖荧光粉的用量, 从而导致制作成本增加, 限制了推广应用; Tian等^[12]通过Eu³⁺掺杂制备红色远程荧光玻璃, 封装后能够直接将点光源转变成面光源, 提高颜色均匀度和显色指数, 但制备需要专用的高温炉煅烧, 工艺复杂, 耗能高, 不利于推广应用; Chen等^[13]将ZrO₂粉末喷涂在荧光粉胶上, 提高了颜色均匀性和光通量, 但是该方法工艺较为复杂, 成本较高; Song等^[14]以单层石墨烯为基底, 在表面脉冲喷涂荧光粉制备远程荧光膜, 石墨烯的引入可以明显提升膜样品的电流稳定性和温度稳定性, 在相关色温5700 K时, 相较于传统的远程荧光粉封装和点胶封装可以分别节省17%和37%荧光粉的用量, 该种工艺制备的器件光通量较低, 工艺复杂, 不易实现产业化的问题.

有别于以上研究, 本文通过热压法制备TiO₂微粒掺入的白光LED器件用远程荧光粉膜(remote phosphor films, RPFs)并进行了封装测试, 研究了样品的发射强度、前后向散射光强及封装后的光色性能, 并进行了机理分析. TiO₂的掺入对远程荧光粉膜和白光LED器件的光色性能有显著的提升, 在不增加荧光粉用量的条件下, 提高器件的光通量及调控相关色温, 相较于实际应用中通过增加荧光粉用量来提升光通量和相关色温调控的方法具有重要的补充作用.

2 实验部分

采用热压法制备TiO₂掺入的远程荧光粉膜并封装成白光LED器件, 原料有硅树脂(道康宁, 美国), YAG:Ce荧光粉(英特美, 美国), TiO₂(东明化工, 中国), 板上芯片封装(COB)蓝光光源(亿量光电, 中国). 实验过程为按照化学计量比称取原料, 利用混胶机将原料混合均匀, 然后将混合物放入模具中, 在平板硫化机上施加10 MPa的压力, 保持温度150 °C, 时间1 h, 冷却, 开模即可制备远程荧光粉膜, 最后将远程荧光粉膜固定在COB蓝光光

源表层, 与芯片距离0.5 mm, 即可制备白光LED器件.

采用远方光电的JY-2003荧光粉相对亮度仪测量远程荧光粉膜的发射强度, 沐澜光学的双积分球测试系统测试膜的前后向散射光强, 远方光电的PMS-80可见光光谱分析系统测试白光LED器件的光色参数, 以上所有测试都是在室温环境下进行.

3 结果与讨论

3.1 远程荧光粉膜样品

图1是通过热压法制备的不同TiO₂浓度的远程荧光粉膜样品图, 从图中可以看出随着TiO₂浓度增大, 样品对于可见光的透光性逐渐降低, 颜色也由黄色逐渐向白色变化.

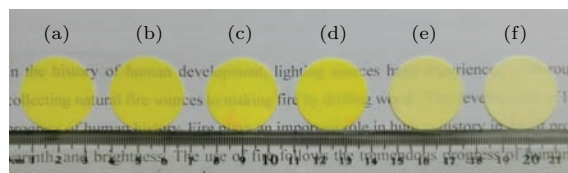


图1 (网刊彩色) 不同TiO₂浓度时远程荧光粉膜样品 (a) 0 g/cm³; (b) 0.096 g/cm³; (c) 0.483 g/cm³; (d) 0.966 g/cm³; (e) 4.83 g/cm³; (f) 9.66 g/cm³

Fig. 1. (color online) Samples of RPFs at different concentrations of TiO₂ particles: (a) 0 g/cm³; (b) 0.096 g/cm³; (c) 0.483 g/cm³; (d) 0.966 g/cm³; (e) 4.83 g/cm³; (f) 9.66 g/cm³.

3.2 散射光强分布曲线

图2是TiO₂和YAG:Ce荧光粉的散射光强分布曲线, 其中TiO₂的折射率为2.7, 中心粒径D₅₀为9.18 μm, YAG:Ce荧光粉的折射率为1.83, 中心粒径D₅₀为15.45 μm. 从图2中可看出荧光粉对于光的散射以前向散射为主, 前向散射强度要高于TiO₂, TiO₂对于光的前向散射强度与后向散射强度相接近. 其中, 决定粒子对于光线散射的角度分布概率主要是根据Henyey-Greenstein函数^[15,16]判断:

$$p(\theta) = \frac{1 - g^2}{4\pi(1 - 2g \cos \theta + g^2)^{3/2}}, \quad (1)$$

式中, g 为不对称因子, 用以表示粒子的散射行为, 当 $g = 1$ 时, 表示光线全部往前, $g = -1$ 时, 表示光线全部往后, $g = 0$, 表示光线等向性传播.

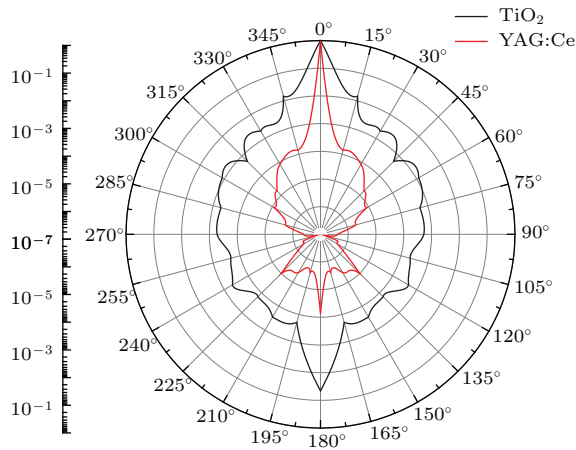


图2 (网刊彩色) TiO₂与YAG:Ce荧光粉的散射光强分布
Fig. 2. (color online) Angular distribution of scattered light for TiO₂ and YAG:Ce phosphor.

3.3 发射光谱强度及相对亮度

图3是不同TiO₂浓度时远程荧光粉膜的发射光谱强度及相对亮度,从图中可以看出,当TiO₂浓度为0.966 g/cm³时,样品的强度及相对亮度达到最大,发射光谱的最大峰值位于550 nm处.发射强度与相对亮度先升后降的主要原因是当TiO₂浓度较低时,TiO₂的散射效应对光的传播具有促进作用,当达到一定值后,过多的TiO₂会对传播的光进行吸收,从而造成所测值的降低.

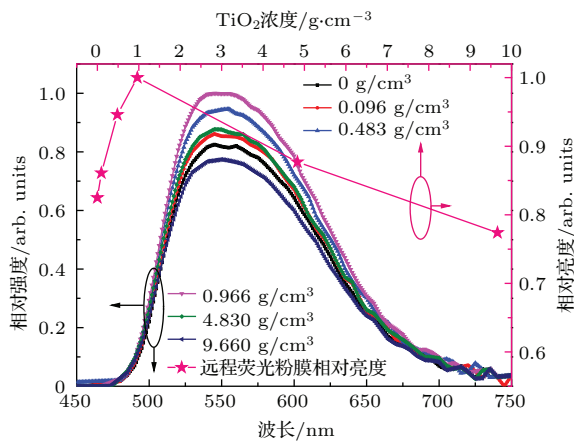


图3 (网刊彩色) 远程荧光粉膜的发射光谱强度及相对亮度
Fig. 3. (color online) Emission spectral intensity and relative luminance of RPFs.

3.4 双积分球测试分析

图4和图5展示的是样品经过双积分球测试系统测试(图5)^[7]的前后向散射强度; η_{BT} , η_{BR} 分别代表蓝光(380—495 nm)的前向透射强度和后向反射强度; η_{YT} , η_{YR} 则分别代表黄光(496—780 nm)

的前向透射强度和后向反射强度. η_{BR} , η_{BR} , η_{YR} 及 η_{YT} 分别通过以下公式计算^[17]:

$$P_{总} = P_{积分球1} + P_{积分球2}, \quad (2a)$$

$$\eta_{BR} = \frac{P_{反射蓝光}}{P_{总}}, \quad (2b)$$

$$\eta_{YR} = \frac{P_{反射黄光}}{P_{总}}, \quad (2c)$$

$$\eta_{BT} = \frac{P_{透射蓝光}}{P_{总}}, \quad (2d)$$

$$\eta_{YT} = \frac{P_{透射黄光}}{P_{总}}, \quad (2e)$$

式中, $P_{总}$ 为未放入样品时积分球1和积分球2所采集到的总的光功率; $P_{积分球1}$, $P_{积分球2}$ 分别是积分球1和球2所采集的光功率; $P_{透射蓝光}$, $P_{透射黄光}$ 分别表示经积分球1采集到的蓝光和黄光的前向透射光功率; $P_{反射蓝光}$, $P_{反射黄光}$ 分别表示经积分球2采集到的蓝光和黄光的后向反射光功率.

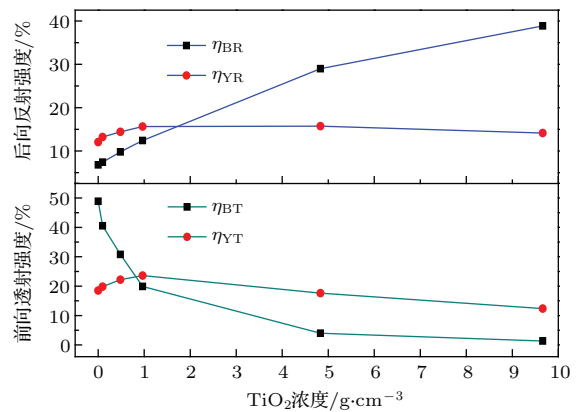


图4 蓝光和黄光的前后向散射强度
Fig. 4. Forward and backward scattering intensity of blue and yellow light.

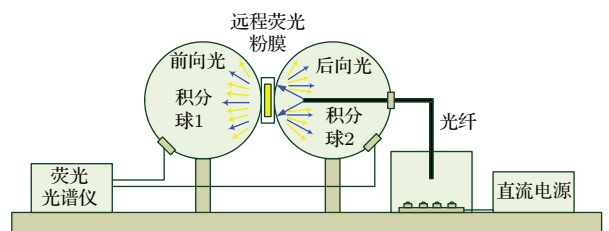


图5 双积分球测试系统
Fig. 5. Double integrating sphere testing system.

从图4可以看出,在远程荧光粉膜样品中,当TiO₂浓度较低时,蓝光的前向透射强度要高于黄光,传播方式主要以前向透射为主;黄光的前后向散射强度则具有近似的测量值和变化趋势,这说明荧光粉出射黄光的概率是各向同性的^[18].随着

TiO₂ 浓度的增大, 蓝光的前向透射强度逐渐降低, 传播方式以后向反射为主, 同时透射强度逐渐低于黄光; 黄光的前后向散射强度都在 TiO₂ 浓度为 0.966 g/cm³ 时达到最大, 随后均逐渐降低.

以上现象的机理可以用图 6 来进行解释^[19]. 区域 A, B, C 分别表示远程荧光粉膜样品在未掺入 TiO₂ (0 g/cm³)、掺入浓度为 (0.096, 0.483, 0.966 g/cm³) 和 (4.83, 9.66 g/cm³) 时所对应的光传播示意图.

在区域 A 中, 未掺入 TiO₂ 时, 由于荧光粉浓度较低, 因此蓝光 (光线①) 可以容易地穿透远程荧光粉膜, 传播方式主要以前向透射为主, 而荧光粉的出射光 (光线③, ④) 则是按照各向同性的方式进行传播.

在区域 B 中, 当掺入 TiO₂ 后, 光传播的方向发生了变化, 蓝光的吸收和黄光的前向透射强度明显增大, 这主要是因为 TiO₂ 的散射效应提高了蓝光被荧光粉吸收的概率 (光线⑤, ⑧, ⑪) 以及黄光前向透射的概率 (光线⑩), 蓝光后向反射 (光线⑥, ⑦) 概率的提高是由于高折射率 TiO₂ (折射率 2.7) 的掺入提高了膜样品的折射率^[17,20], 如 (3a)—(3d) 式所示, 从而增强了界面处蓝光全反射的概率, 如 (4a)—(4b) 式所示, 将蓝光反射回来, 所以整体上表现为蓝光的后向反射强度增强, 前向透射强度降低.

$$n_{\text{膜样品}} = \chi_{\text{荧光粉}} n_{\text{荧光粉}} + \chi_{\text{TiO}_2} n_{\text{TiO}_2} + \chi_{\text{硅树脂}} n_{\text{硅树脂}}, \quad (3a)$$

式中, $n_{\text{膜样品}}$, $n_{\text{荧光粉}}$, n_{TiO_2} , $n_{\text{硅树脂}}$ 分别表示远程荧光粉膜样品折射率、荧光粉的折射率、TiO₂ 的折

射率和硅树脂的折射率; $\chi_{\text{荧光粉}}$, χ_{TiO_2} , $\chi_{\text{硅树脂}}$ 分别表示荧光粉粒子、TiO₂ 粒子和硅树脂在远程荧光粉膜中的体积比, 其中 $\chi_{\text{荧光粉}} n_{\text{荧光粉}} + \chi_{\text{硅树脂}} n_{\text{硅树脂}}$ 为常数, 用字母 C 表示. 因此 (3a) 式可表示为

$$n_{\text{膜样品}} = C + \chi_{\text{TiO}_2} n_{\text{TiO}_2}. \quad (3b)$$

χ_{TiO_2} 与 TiO₂ 粒子浓度 c 满足如下关系:

$$c = \rho_{\text{TiO}_2} \chi_{\text{TiO}_2} = \frac{4}{3} \pi r^3 N(r)_{\text{TiO}_2} \rho_{\text{TiO}_2}, \quad (3c)$$

式中, $N(r)_{\text{TiO}_2}$, ρ_{TiO_2} 分别为 TiO₂ 粒子的浓度分布函数和密度, 均为常数. 联立 (3b) 和 (3c) 式可得

$$n_{\text{膜样品}} = C + \frac{c}{\rho_{\text{TiO}_2}} n_{\text{TiO}_2}, \quad (3d)$$

可以看出, 远程荧光粉膜的折射率与 TiO₂ 粒子浓度成正比关系.

光线在远程荧光粉膜与空气界面处的传播符合全反射定律:

$$n_{\text{膜样品}} \sin \alpha_1 = n_{\text{空气}} \sin \alpha_2. \quad (4a)$$

当刚好发生全反射时, $\alpha_2 = 90^\circ$, 临界角 α_1 为

$$\alpha_1 = \arcsin \frac{n_{\text{空气}}}{n_{\text{膜样品}}} = \arcsin \frac{1}{C + \frac{c}{\rho_{\text{TiO}_2}} n_{\text{TiO}_2}}. \quad (4b)$$

已知空气的折射率为 1, 所以结合 (3d) 式可知随着 TiO₂ 浓度的增加, 全反射临界角减小, 发生全反射的概率增大.

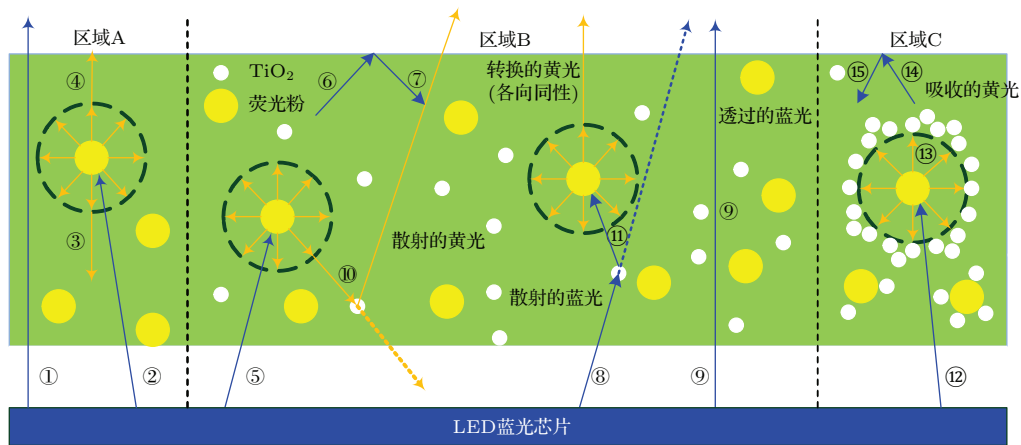


图 6 (网刊彩色) 不同浓度 TiO₂ 时远程荧光粉膜中光传播方向示意图

Fig. 6. (color online) Schematic diagram of light propagating direction in RPFs mixing with different concentration TiO₂ particles.

在区域C中,当TiO₂的掺入量达到一定值后,TiO₂则会对荧光粉形成包围团聚.此时荧光粉转换的黄光(光线③)则会陷入TiO₂粒子团,在荧光粉与TiO₂两相来回反射直至被吸收掉,导致黄光的前向透射和后向反射强度逐渐减弱,黄光总光功率降低.同时根据(3d)和(4b)式远程荧光粉膜样品的折射率继续增大,界面处的全反射现象增强,蓝光的后向反射强度逐渐增大.

3.5 封装测试分析

将远程荧光粉膜和COB蓝光光源封装制备白光LED器件,驱动电流、电压分别为300 mA和9.3 V.光色参数测试结果如表1和图7、图8所示.从表1可以看出,在相同电流的驱动下,白光LED器件的表面光色由蓝白向黄白变化,这一现象可以很好地证明图4的结论,即随着TiO₂浓度的增大,蓝光的前向透射强度逐渐低于黄光的强度.

图7和图8表示的是相关色温、光通量和CIE色坐标的变化趋势,从图中可以看出,相关色温逐渐降低、CIE色坐标逐渐从蓝光芯片位置向荧光粉位置移动,以上两种现象符合表1和图4中的变化趋势.从图7中还可以看出,在驱动电流、电压为300 mA和9.3 V的条件下,当TiO₂的掺入浓度为0.966 g/cm³时,所制备的白光LED器件的光通量取得最大值415.28 lm,相较于未掺入TiO₂时的光通量提高了8.15%,相关色温也从6900 K的冷白区转向了3832 K的暖白区,这说明TiO₂的掺入不仅

可以提高器件的光通量,同时还能够对相关色温进行调节.

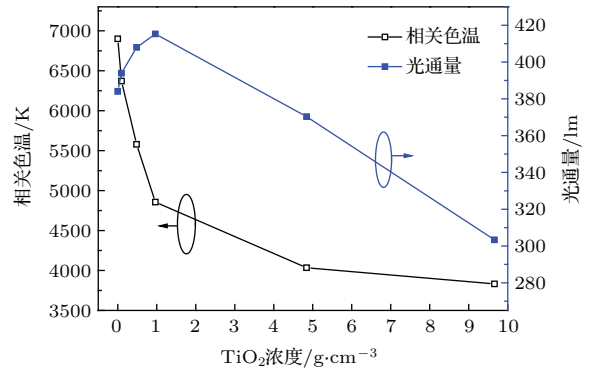


图7 白光LED器件相关色温及光通量

Fig. 7. CCT and luminous flux of WLEDs.

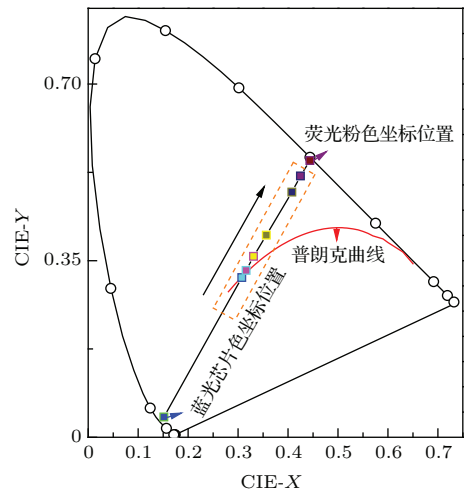


图8 (网刊彩色) 白光LED器件色坐标

Fig.8. (color online) CIE1931 of WLEDs.

表1 (网刊彩色) 白光LED器件及表面光色图

Table 1. (color online) Pictures of WLEDs and surface photochromic.

	a	b	c	d	e	f
白光LED						
表面光色						

4 结论

远程荧光粉封装作为一种高效的LED封装结构,具有潜在的应用价值.本文通过掺入TiO₂对

远程荧光粉膜及白光LED器件进行了改善,对膜样品和白光LED器件进行了光色性能的测试分析.分析结果表明,TiO₂的掺入可以明显改善两者的光色性能,在TiO₂掺入浓度为0.966 g/cm³时,所制备的白光LED器件的光通量最高达到

415.28 lm, 相较于未掺入TiO₂时提高了8.15%, 相关色温则从6900 K转变至3832 K, 这些变化主要是由于TiO₂的散射效应提高了蓝光的利用率和黄光的前向透射强度. 通过该项研究, 我们可以很容易地制备出光通量高、相关色温可调的白光LED器件, 相较于通过提高荧光粉的用量来提高光通量和降低色温的方法, 具有成本低、效果明显的优点.

参考文献

- [1] Zukauskas A, Shur M S, Caska R 2002 *Introduction to Solid-State Lighting* (New York: John Wiley) pp1–6
- [2] Liu S, Luo X B 2011 *LED Packaging for Lighting Applications* (New York: John Wiley) pp1–28
- [3] Hu R, Luo X B, Zheng H 2012 *J. Appl. Phys.* **21** 09 MK05
- [4] Xiao H, Lü Y J, Xu Y X, Zhu L H, Chen G L, Gao Y L, Fan X G, Xue R C 2014 *Chin. J. Lumin.* **35** 66 (in Chinese) [肖华, 吕毅军, 徐云鑫, 朱丽虹, 陈国龙, 高玉琳, 范贤光, 薛睿超 2014 发光学报 **35** 66]
- [5] Dong M Z, Wei J, Ye H Y, Yuan C M, Zhang G Q 2013 *J. Semicond.* **34** 053007
- [6] Tsai P Y, Huang H K, Sung J M, Kan M C, Wang Y H 2015 *IEEE Electr. Dev. Lett.* **36** 250
- [7] Narendran N, Gu F, Freyssonier-Nova J P, Zhu Y 2005 *Phys. Status Solid A* **202** R60
- [8] Allen S C, Steckl A J 2007 *J. Disp. Technol.* **3** 155
- [9] Lin M T, Ying S P, Lin M Y, Tai K Y, Tai S C, Liu C H, Chen J C, Sun C C 2010 *Photon. Technol. Lett.* **22** 574
- [10] Lin M T, Ying S P, Lin M Y, Tai K Y, Tai S C, Liu C H, Chen J C, Sun C C 2014 *IEEE Trans. Dev. Mat. Re.* **14** 358
- [11] Xiao H, Lu Y J, Shin T M, Zhu L H, Lin S Q, Pagni P J, Chen Z 2014 *IEEE Photon. J.* **6** 1
- [12] Tian H, Liu J W, Qiu K, Song J, Wang D J 2012 *Chin. Phys. B* **21** 098504
- [13] Chen H C, Chen K J, Lin C C, Wang C H, Han H V, Tsai H H, Kuo H T, Chien S H, Shih M H, Kuo H C 2012 *Nanotechnology* 231
- [14] Song Y H, Ji E K, Bak S H, Kim Y N, Lee D B, Jung M K, Jeong B W, Yoon D H 2016 *Chem. Eng. J.* **287** 511
- [15] Henyey L G, Greenstein J L 1941 *Astrophys. J.* **93** 70
- [16] Qian K Y, Ma J, Fu W, Luo Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 204201 (in Chinese) [钱可元, 马俊, 付伟, 罗毅 2012 物理学报 **61** 204201]
- [17] Liu Z Y 2010 *Ph. D. Dissertation* (Wuhan: Huazhong University of Science and Technology) (in Chinese) [刘宗源 2010 博士学位论文 (武汉: 华中科技大学)]
- [18] Liu Z Y, Liu S, Wang K, Luo X B 2010 *Appl. Opt.* **49** 247
- [19] Hsiao S L, Hu N C, Wu C C 2013 *Appl. Phys. Express* **6** 032102
- [20] Heller W 1965 *J. Phys. Chem.* **69** 1123

Investigation of photo-chromic properties of remote phosphor film and white light emitting diode mixed with TiO₂ particles*

Zhuo Ning-Ze¹⁾ Zhang Na¹⁾ Li Bo-Chao²⁾ Li Wen-Quan²⁾ He Qing-Yang²⁾
Shi Feng-Hua¹⁾ Zhu Yue-Hua¹⁾ Xing Hai-Dong¹⁾ Wang Hai-Bo^{1)†}

1) (Research Institute of Electric Light Source Materials, Nanjing Tech University, Nanjing 210015, China)

2) (College of materials science and engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China)

(Received 23 November 2015; revised manuscript received 9 December 2015)

Abstract

Based on the hot pressing method, the remote phosphor films are prepared by adding TiO₂ particles into YAG:Ce and silicon binder, and then they are packaged into white light emitting diode (WLED) device with chip on board (COB) blue light source. The photo-chromic properties and mechanism are studied and calculated. Based on Mie theory and Henyey-Greenstein function, forward scattering is the main light scattering form of YAG:Ce phosphor powder, while the forward scattering intensity is close to the back scattering intensity of TiO₂ particles. The emission spectral intensity and relative luminance of remote phosphor film change with increasing the concentration of TiO₂ particles, and the optimum concentration is 0.966 g/cm³. Forward transmission intensity and back reflection intensity are calculated and analyzed, when the concentration of TiO₂ is low, the forward transmission intensity of blue light is stronger than that of yellow light and the main transmission form is forward transmission, while the forward and backward intensity of yellow light are similar because of isotropy. With increasing the concentration of TiO₂, the forward intensity of blue light gradually decreases, and the transmission intensity is lower than that of yellow light. The forward and backward intensity of yellow light reach their maxima when the TiO₂ concentration is 0.966 g/cm³. The main reason for this phenomenon is that the increasing of the utilization ratio between blue light and transmission of yellow light is affected by the strong scattering ability of TiO₂. Finally the WLEDs are packaged by remote phosphor films and COB blue light source, the luminous flux of WLED reaches 415.28 lm (at 300 mA and 9.3 V) at a concentration of 0.966 g/cm³, which is increased by 8.15% compared with the concentration in the case of no TiO₂ mixing. Besides, the correlated color temperature changes from cool white 6900 K to warm white 3832 K gradually. Consequently, the adding of TiO₂ particles can not only improve the emission intensity of remote phosphor film and the luminous flux of WLED, but also regulate the correlated color temperature.

Keywords: TiO₂ particles, remote phosphor films, white light emitting diodes, luminous flux

PACS: 85.60.Jb, 78.55.-m, 42.25.Fx

DOI: 10.7498/aps.65.058501

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2011AA03A107) and the Scientific and Technological Achievements Transformation Plan of Jiangsu Province, China (Grant No. BA2014073).

† Corresponding author. E-mail: Wanghaibo88@163.com