

研究与试制

DOI:10.19453/j.cnki.1005-488x.2022.04.013

# 抽光层掺杂纳米颗粒对白光LED模块光色性能的影响

盛立军<sup>1\*</sup>, 许振军<sup>2</sup>, 张东晓<sup>1</sup>

(1. 绍兴职业技术学院, 浙江 绍兴 312000; 2. 浙江古越龙山电子科技发展有限公司, 浙江 绍兴 312000)

**摘 要:** 采用热溶液法在倒装芯片表面涂覆掺杂有纳米颗粒的抽光层, 在抽光层上涂覆荧光粉层制备白光LED模块。利用仪器设备对样品的光色性能进行了测量和分析。实验发现, TiO<sub>2</sub>掺杂颗粒粒径由16 nm增大到46 nm, 模块光效幅度增加0.75%, 色温提升0.57%, 空间角度色温均匀性由0.869 3增大到0.87; 通过调节TiO<sub>2</sub>颗粒掺杂浓度, 发现模块色温平均值先升后降, 分布呈边缘低中间高的态势; 在掺杂浓度为0.8%时, 模块光效提高约5.75%, 平均色温提高了9.17%。结果表明, 在满足Rayleigh散射条件下, 粒径大小对模块光色性能影响不明显。通过在抽光层掺杂一定比例的TiO<sub>2</sub>纳米颗粒, 可提高白光LED模块出光效率, 同时能有效改善模块的空间色温均匀性。

**关键词:** 光学器件; 白光LED; 空间角度色温均匀性; 纳米颗粒

**中图分类号:** TN873 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-488X(2022)04-0325-06

## Effect of Isolation Doped Nanoparticles on the Optical Color Performance of White LED Modules

SHENG Lijun<sup>1</sup>, XU Zhenjun<sup>2</sup>, ZHANG Dongxiao<sup>1</sup>

(1. *Shaoxing Vocational & Technology College, Shaoxing Zhejiang 312000, CHN*; 2. *Zhejiang Guyue Longshan Electronic Technology Development Co. LTD, Shaoxing Zhejiang 312000, CHN*)

**Abstract:** The surface of the flip chip was coated with an extraction layer doped with nanoparticles by hot solution method, and the phosphor layer was coated on extraction layer to prepare the white LED module. The photochromatic properties of the samples were measured and analyzed by means of instruments. The experimental results showed that when the particle size of TiO<sub>2</sub> doped particles increased from 16 nm to 46 nm, the optical efficiency amplitude of the module increased by 0.75%, the color temperature increased by 0.57%, and the color temperature uniformity of spatial angle increased from 0.869 3 to 0.87. By adjusting the doping concentration of TiO<sub>2</sub> particles, it was found that the average color temperature of the module could rise first and then fell, and the distribution showed a trend of low edge and high middle. When the doping concentration was 0.8%, the opti-

收稿日期: 2022-06-07

作者简介: 盛立军(1977—), 男, 副教授, 主要从事光电子技术研究; (E-mail: shenglj@sxvtc.edu.cn)

许振军(1979—), 男, 高级工程师, 主要从事贴片式二极管、光电子器件的产品研发和封装技术研究;

张东晓(1980—), 男, 讲师, 主要从事信息技术研究。

\* 通讯作者

cal efficiency of the module increased by about 5.75% and the average color temperature increased by 9.17%. The results showed that under the condition of Rayleigh scattering, the particle size had no obvious effect on the optical performance of the module. By doping a certain proportion of TiO<sub>2</sub> nanoparticles in the optical extraction layer, the light output efficiency of the white LED module could be improved, and the spatial color temperature uniformity of the module could be effectively improved.

**Key words:** optical device; white LED; spatial angle color temperature uniformity; nanoparticle

## 引 言

白光数码管是由多个白光LED模块组成的光学器件,模块实现白光的常用方法多为蓝光芯片表面涂覆YAG黄色荧光粉,蓝光芯片激发荧光粉颗粒产生黄绿光,剩余蓝光光子和黄绿光混合形成白光<sup>[1-2]</sup>。为提高显示器件的出光效率和一致性,有学者提出远程荧光粉涂覆工艺,以减少“热淬灭”现象<sup>[3-4]</sup>。Kim J K等<sup>[5]</sup>学者研究发现,荧光粉层采用远程工艺,能有效减少光子后向散射,白光LED光效提高7%。Ryckaert J等<sup>[6]</sup>提出了YAG:Ce荧光粉与InP/CdxZn1-xSe型量子点相结合的一种混合型远程荧光粉白色LED的方法,实验证明,制备的远程荧光粉LED,总功效为110lm/W。俞鑫坚等<sup>[7]</sup>设计一种基于点涂法的半球薄层荧光粉涂覆工艺,有效提高出光一致性。肖华等<sup>[8]</sup>通过研究蓝光激发的球冠形远程荧光粉白光LED在不同电流、不同热沉温度下的发光性能,得出远程荧光粉白光LED的光强分布呈类似蝠翼,空间均匀性优于传统白光LED。盛立军等<sup>[9]</sup>提出一种梯度折射结构的白光LED模块,在芯片和荧光粉层间添加掺杂有ZnO颗粒的隔离层,结果表明该结构对其空间色均匀性影响显著。KUO等<sup>[10]</sup>提出一种双层远程荧光粉结构,荧光粉层间用硅胶填充,通过调节两层荧光粉浓度,光通量提升5%,能明显改善白光LED性能。卓宁泽等<sup>[11]</sup>提出一种双层远程荧光膜,并封装出白光LED的方法,该方法能有效提升发光效率,最高可达300.7lm·W<sup>-1</sup>。

也有学者采用在荧光粉层掺杂颗粒的方式<sup>[12-13]</sup>提升白光LED光学性能。孟国云等<sup>[14]</sup>通过溶胶-凝胶法制备了阳离子铈(III)配合物掺杂的SiO<sub>2</sub>颗粒,同时将颗粒按不同掺入比例掺杂到环氧树脂中,制备的发光器件最大发光效率达到了51.9lm/W。Santosh K等<sup>[15]</sup>将纳米粒子(NPs)与Eu<sup>3+</sup>、Tb<sup>3+</sup>、Dy<sup>3+</sup>单项掺杂和混合掺杂,研究结果表明不同纳米

粒子(NPs)的掺杂浓度能改变白光LED色温。Guner T等<sup>[16]</sup>提出了一种简便制备掺镧氢氧化物荧光粉的方法,实验表征,通过该方法得到的白光在发光效率方面有了明显的提高,色温略有降低。Game D N等<sup>[17]</sup>采用碳热还原法合成多晶CaS:Ce<sup>3+</sup>和SrS:Ce<sup>3+</sup>荧光粉,计算Ce<sup>3+</sup>掺杂CaS和SrS荧光粉的CIE坐标,实验结果表明,制备的荧光粉适用于pc-WLED。卓宁泽等<sup>[18]</sup>在荧光粉层掺杂TiO<sub>2</sub>纳米颗粒封装白光LED,实验结果表明不同的TiO<sub>2</sub>掺杂浓度能提高器件光通量,最高可达415.28lm,并能有效降低色温。盛立军等<sup>[19]</sup>提出一种在荧光粉薄膜片和倒装芯片周围旋涂掺杂有TiO<sub>2</sub>纳米颗粒硅胶混合胶层的结构,制备成白光数码管,结果表明该结构能制备出可视角度小、出光一致性高的白光数码管。

上述文献都是基于远程荧光粉技术和在荧光粉层掺杂纳米颗粒的研究,在一定范围内能提高白光LED光色性能。芯片和荧光粉层的中间层通常称为抽光层,常用硅胶作为材料,加入抽光层能实现远程荧光粉技术,减小芯片发出的光子重新被其表面吸收的概率,有效控制芯片热量,降低芯片结温对荧光粉使用寿命的影响,进一步提高光子的抽取率<sup>[20]</sup>。针对在硅胶为材料的抽光层中掺杂纳米颗粒能否提升白光LED光学特性,报道甚少。文章在远程荧光封装技术和热溶液技术基础上,提出利用热溶液和高温固相法在倒装芯片和荧光粉层间的抽光层掺杂TiO<sub>2</sub>纳米颗粒,并对白光LED模块进行光色性能实验,从实验数据和理论机制上分析掺杂颗粒的粒径和浓度对白光LED模块光色性能的影响。

## 1 实验部分

样品一:取若干规格为(205μm±30μm)×(505μm±30μm)的倒装芯片(晶鸿光电,主波长454.6nm),使用等离子清洗机(东莞启天)清洗芯片备用。

将不同粒径的TiO<sub>2</sub>(阿拉丁)纳米颗粒以0.8%的质量比掺杂到硅胶层(道康宁公司)配置成若干份浆料,均匀搅拌后,利用真空脱泡机(深圳摩典机电)脱泡。将上述浆料点涂于倒装芯片表面,采用热溶液法,将涂覆有浆料的芯片置于180℃的溶液中,待浆料形态稳定后,将芯片从溶液中取出,利用高温固相法在环境温度为180℃的加热设备(深圳摩典机电)中固化2小时,得到稳定的抽光层薄膜备用。使用型号为4-3-2的黄色荧光粉(有研稀土)掺入硅胶LPS-3421T和C-3421T按1:0.1:0.07的质量比制备荧光粉层,采用热溶液法,将荧光粉浆料固化于抽光层表面形成厚度超薄、一致性较高的荧光胶膜,制备成白光LED模块。

样品二:利用上述实验步骤的材料和设备,将相同粒径的TiO<sub>2</sub>纳米颗粒按0%、0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1.0%、1.2%的质量比掺杂到硅胶层配置成若干份浆料,根据样品一的实验步骤,制备成白光LED模块。根据上述步骤制备白光LED模块样品若干,如图1所示。

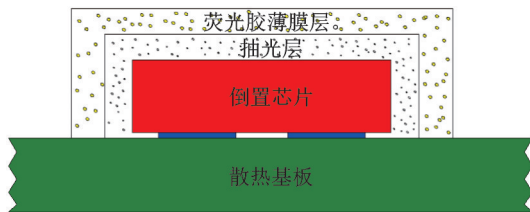


图1 白光LED模块结构图

Fig.1 Structural diagram of white LED module

在直流额定电流为20 mA,温度25℃,湿度60%的环境下,通过远方空间光谱辐射计、远方LED光学测试系统和光谱分析系统(杭州远方光电信息有限公司)等光学设备,测量样品光色参数。

## 2 结果与讨论

### 2.1 掺杂颗粒粒径对白光LED模块光色性能影响

样品一实验所选取的掺杂TiO<sub>2</sub>纳米颗粒平均粒径分别为16 nm、22 nm、28 nm、36 nm、46 nm,实验结果如图2所示。

由图2可知,随着颗粒粒径增大,白光LED模块光效增加,增加幅度为0.75%。抽光层的Rayleigh散射系数可通过式(1)计算。

$$k_s = \frac{2\pi^5}{3} \left( \frac{n_{\text{TiO}_2}^2 - n_{\text{sil}}^2}{n_{\text{TiO}_2}^2 + n_{\text{sil}}^2} \right) \frac{(2r_{\text{TiO}_2})^6}{(\lambda/n_{\text{sil}}^2)^4} \frac{L}{(4/3)\pi r_{\text{TiO}_2}^3} \quad (1)$$

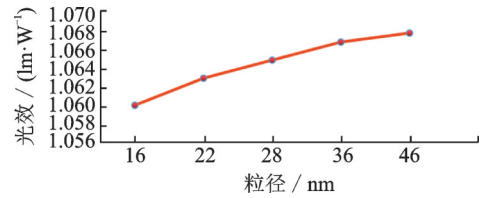


图2 光效随颗粒粒径变化曲线

Fig.2 Changing curve of light effect with particle size

其中, $k_s$ 为混合物散射系数, $n$ 为截止折射率(二氧化钛折射率:2.55~2.76,硅胶折射率:1.547), $L$ 为纳米颗粒掺杂比例, $\lambda$ 为蓝光波长, $r_{\text{TiO}_2}$ 为二氧化钛粒子半径。

由式(1)可知,在掺杂浓度一定的情况下,抽光层混合折射率基本保持不变,在不考虑“团聚现象”因素的情况下,混合物的散射系数和纳米颗粒粒子半径的三次方成正比。根据Rayleigh散射条件,粒径越大,散射系数越大,单位时间内光能的损失和散射系数成正比,同时由式(1)可知,散射强度与蓝光波长四次方成反比,为控制光散射现象,减少光能损失,纳米粒子的粒径应控制在46 nm以下(约为波长的十分之一<sup>[21]</sup>),可以在降低粒子折射现象的同时增加抽光层光子输出效率。

空间颜色均匀性是衡量白光LED模块出光一致性的重要性能指标,评估空间色温均匀性重要指标之一为角度CCT偏差<sup>[22]</sup>。空间角度色温均匀性可通过式(2)计算。

$$C_{\text{ACU}} = \frac{T_{\text{min}}}{T_{\text{max}}} \quad (2)$$

其中, $C_{\text{ACU}}$ 为空间角度色温均匀性, $T_{\text{min}}$ 、 $T_{\text{max}}$ 分别为测量得到的色温最小值及最大值。

图3为同一测量环境下,不同粒径下色温的分布状况。由图3可知,粒径由16 nm增加到46 nm,色温幅度增加不明显,平均幅度由5 636.01 K增大到5 667.95 K,增大了0.57%。根据式(2),测量角度在[-70, 70]区间的空间角度色温均匀性由0.869 3增大到0.87。TiO<sub>2</sub>纳米颗粒粒径小于蓝光波长,因此光线在抽光层中发生的散射机制主要是Rayleigh散射,随着颗粒粒径增大,前向散射幅度增强,通过抽光层进入荧光粉薄膜层的蓝光光子数增加,相应的白光LED模块色温有所上升,同时,粒径增大,散射系数增大,增大散射系数实际上就是增加了蓝光光子在抽光层的光程,使不同角度下色温差异性减小,空间角度色温均匀性有改善趋势,但幅度不大。



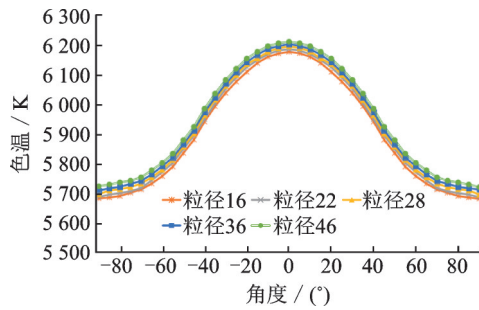


图3 不同颗粒粒径空间色温分布

Fig.3 Color temperature distribution of different particle sizes

## 2.2 掺杂颗粒浓度对白光LED模块光色性能的影响

针对样品二根据不同掺杂浓度的纳米颗粒(选取颗粒平均粒径为22 nm,符合瑞利散射公式粒径大小约为光波长的1/10的条件)制备得到的白光LED模块,进行光色测量。图4为抽光层TiO<sub>2</sub>纳米颗粒不同掺杂浓度下白光LED模块光效值,由图可知,随着掺杂浓度增加,光效提升,在0.8%浓度时出现拐点,光效提升幅度比无掺杂时提高约5.75%,掺杂浓度进一步增加,光效逐渐下降。

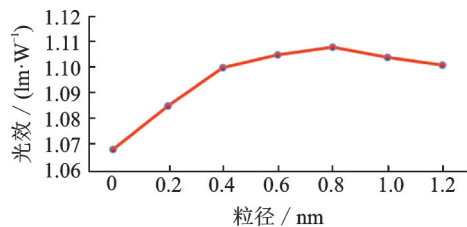


图4 光效随颗粒掺杂浓度变化曲线

Fig.4 Changing curve of light effect with particle doping concentration

上述变化机制可用图5来解释,抽光层中硅胶折射率为1.547, TiO<sub>2</sub>纳米颗粒折射率为2.5,当TiO<sub>2</sub>浓度增加时,混合折射率增大<sup>[22]</sup>,抽光层下表面全反射临界角增大,进入抽光层的光子数增加(光线①②③),芯片外量子效率增加,相应的光子在抽光层经多次折射、反射(光线⑤⑥)后增加了进入荧光粉层的几率,荧光粉颗粒受激发的几率增加,溢出白光LED模块的光子数也相应增加。随着掺杂浓度超过0.8%,抽光层混合折射率相对于荧光粉层折射率提高,抽光层上表面界面间临界角减小,发生界面全反射几率增加(光线⑦),进入荧光粉层的光子数相对于峰值时减少,溢出LED模块的光子数也减少。

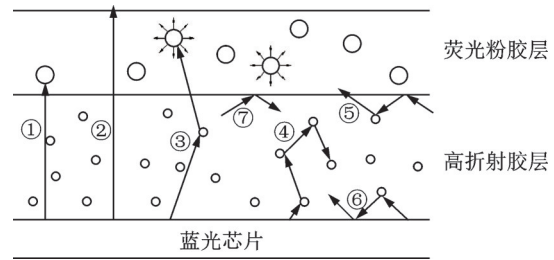


图5 光传播示意图

Fig.5 Schematic of light propagation

光源发射的光子服从朗伯分布,从中心法线开始随着角度递增逐渐衰减,相应的界面处色温也会降低,导致色温分布不均匀。图6为同一测量环境下,不同TiO<sub>2</sub>纳米颗粒掺杂浓度色温的分布状况。由图6可知,白光LED模块色温分布呈边缘低中间高的态势。随着纳米颗粒掺杂浓度增加,色温平均值呈先升后降。未掺杂颗粒时,色温平均值为5 413.78 K,最高值为5 910 K,纳米颗粒掺杂浓度为0.8%时,色温分布出现拐点,色温平均值为5 667.95 K,最高值为6 076 K,平均色温提高了9.17%;随着掺杂浓度继续增加,色温幅度有所下降,掺杂浓度为1.2%时,色温最高值为5 964 K。表1为不同掺杂浓度下色温C<sub>ACU</sub>值,由表1可知,纳米颗粒掺杂浓度增加,相应掺杂浓度的色温分布曲线趋于平缓,C<sub>ACU</sub>值由未掺杂时的0.843上升到掺杂浓度为1.2%时的0.903,空间角度色温均匀性提高了约7.12%。

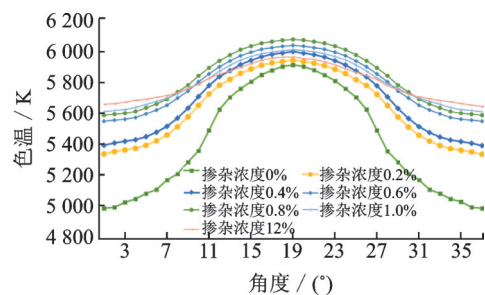


图6 不同颗粒掺杂浓度空间色温分布

Fig.6 Color temperature distribution of different particle doping concentrations

随着颗粒掺杂浓度增加,进入抽光层的光子数增加(光线①②③);粒子散射作用和混合折射率增加,使进入荧光粉层的蓝光光子数几率增加(光线⑤),蓝光光子在激发荧光粉颗粒(光线①③)的同时,其直接溢出白光LED模块的几率也增加(光线②),导致色温上升。由图6可知,白光LED模块是点光源,色温服从朗伯分布,随着颗粒掺杂浓度增

加,进入抽光层的蓝光光子被多次折射和反射(光线④⑤⑥),光子光程增长,部分光子被吸收(光线④);纳米颗粒掺杂浓度的进一步增加,导致进入荧光粉层的光子数相应减少;其次,光子被多次折射、反射,除了部分被吸收外,其余光子被扩散,光子在抽光层的均匀性得到提高,抽光层光子相对均匀的人射到荧光粉层,芯片点光源的朗伯分布得到改善,掺杂浓度越高,白光LED模块空间色温均匀性越趋平稳。

表1 不同掺杂浓度ACU值

掺杂浓度/ (%)	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2
$C_{ACU}$	0.843	0.857	0.861	0.864	0.870	0.892	0.903

### 3 结 语

光效和空间角度色温均匀性是衡量白光LED模块光学性能主要的评价指标。在倒装芯片表面采用热溶液法涂覆掺杂有TiO<sub>2</sub>纳米颗粒的抽光层,固化后,再采用热溶液法在抽光层表面涂覆荧光粉薄膜层,制备得到白光LED模块,对模块进行光色性能的测量。

实验发现:(1)根据Rayleigh散射条件,在抽光层掺杂TiO<sub>2</sub>纳米颗粒,随着颗粒粒径增大,白光LED模块光效增加幅度为0.75%。粒径由16 nm增加到46 nm,色温增大了0.57%,空间角度色温均匀性由0.869 3增大到0.87。说明在Rayleigh散射条件下,颗粒粒径的大小对白光LED模块光效和空间角度色温均匀性影响不显著,同时粒径越小,越容易产生“团聚现象”;

(2)对抽光层TiO<sub>2</sub>纳米颗粒不同掺杂浓度下白光LED模块光效和空间角度色温均匀性进行测量,发现随着掺杂浓度增加,在0.8%浓度时,光效提升幅度比无掺杂时提高约5.75%,掺杂浓度进一步增加,光效逐渐下降。白光LED模块色温分布呈边缘低中间高的态势;

(3)随着纳米颗粒掺杂浓度增加,色温平均值呈先升后降的变化,纳米颗粒掺杂浓度为0.8%时,平均色温提高了9.17%,随着掺杂浓度继续增加,色温幅度有所下降。同时纳米颗粒掺杂浓度增加,相应掺杂浓度的色温分布曲线趋于平缓,掺杂浓度为1.2%时的空间角度色温均匀性比未掺杂颗粒时提高了约7.12%,说明在抽光层掺杂一定浓度的纳米

颗粒对模块的光色性能有一定的改善。

综上,采用在隔离层掺杂纳米颗粒的方法,研究白光LED模块的光色性能,结果显示,通过改变纳米颗粒掺杂浓度,可提高白光LED模块出光效率,同时能有效改善模块的空间色温。

### 参 考 文 献

- [1] 盛立军.基于点胶技术的白光数码管研究[J].光学技术,2013,39(3):286-288.
- [2] 盛立军.倒置芯片单面出光白光数码管的光色性能[J].光电子·激光,2018,29(2):138-142.
- [3] Smet P F, Parmentier A B, Poelman D. Selecting conversion phosphors for white light-emitting diodes [J]. Journal of The Electrochemical Society, 2011, 158(6):R37-R54.
- [4] Duke Anna C, Finley Erin, Hermus Martin, et al. Yellow-green luminescence and extreme thermal quenching in the Sr<sub>6</sub>M<sub>2</sub>Al<sub>4</sub>O<sub>15</sub>:Eu<sup>2+</sup> (M=Y, Lu, Sc) phosphor series [J]. Solid State Sciences, 2016, 60:108-113.
- [5] Kim J K, Luo E H, Schubert F, et al. Strongly enhanced phosphor efficiency in GaInN white light-emitting diodes using remote phosphor configuration and diffuse reflector cup [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2005, 44:L649-L651.
- [6] Jana Ryckaert, António Correia, Tessier Mickael D, et al. Selecting the optimal synthesis parameters of InP/Cd<sub>x</sub>Zn<sub>1-x</sub>Se quantum dots for a hybrid remote phosphor white LED for general lighting applications [J]. Optics Express, 2017, 25 (24) : A1009-A1022.
- [7] Yu Xingjian, Xie Bin, Chen Qi, et al. Thermal remote phosphor coating for phosphor-converted white-light-emitting diodes [J]. IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, 2015, 5(9):1253-1257.
- [8] Xiao Hua, Liu Yijun, Xu Yunxin, et al. The difference of luminous performance between traditional phosphor packaging LED and remote phospho LED [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2014, 1:66-72.
- [9] 盛立军,傅彬.基于梯度折射结构白光数码管光色一致性研究[J].光电子·激光,2019,30(9):912-916.
- [10] Chen K J, Chen H C, Shih M H, et al. Enhanced luminous efficiency of WLEDs using a dual-layer structure of the remote phosphor package [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(12):1941-1945.
- [11] Zhuo Ningze, Zhang Na, Chen Yonghao, et al. Preparation and spectral properties of white light emitting LED based on layered remote phosphor film [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(8):2337-2343.
- [12] Shao Xiuchen, Zhou Shengming, Tang Yanrui, et al. Luminescence characteristics of Ce: YAG ceramic phosphors with Gd<sup>3+</sup> doping for white light-emitting diodes [J]. Journal of Inorganic Materials, 2018, 33(10):1119-1123.
- [13] Wang Yongrui, Geng Xiujian, Xie Jixing, et al. Synthesized and luminescent properties of white phosphor NaGd(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>:Dy<sup>3+</sup> \ Tm<sup>3+</sup> [J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2019, 30

- (10):1043-1049.
- [14] Meng Guoyun, Chen ZeYu, Liu Yong, et al. Cationic Iridium (III) complex doped in SiO<sub>2</sub> micropowder: Preparation and application in light-emitting diodes[J]. Journal of Inorganic Materials, 2015, 30(11):1195-1200.
- [15] Gupta Santosh K, Zuniga Jose P, Abdou Maya, et al. Lanthanide-doped lanthanum hafnate nanoparticles as multicolor phosphors for warm white lighting and scintillators[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 379:122314.
- [16] Tugrul Guner, Anilcan Kus, Mehmet Ozcan, et al. Green fabrication of lanthanide-doped hydroxide-based phosphors: Y(OH)<sub>3</sub>:Eu<sup>3+</sup> nanoparticles for white light generation[J]. Beilstein Journal of Nanotechnology, 2019, 10:1200-1210.
- [17] Game D N, Ingale N B, Omanwar S K. Converted white light emitting diodes from Ce<sup>3+</sup> doping of alkali earth sulfide phosphors[J]. Materials Discovery, 2016, 4:1-7.
- [18] Zhuo Ningze, Zhang Na, Li Bochao, et al. Investigation of photochromic properties of remote phosphor film and white light emitting diode mixed with TiO<sub>2</sub> particles[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(5):356-362.
- [19] 盛立军, 傅彬. 梯度结构荧光薄膜片对白光数码管光色性能的影响[J]. 光电子·激光, 2018, 29(11):1162-1166.
- [20] Ying S P, Fu H K, Tu H Z. Curved remote phosphor structure for phosphor-converted white LEDs[J]. Photonics Technology Letters IEEE, 2010, 22(8):574-576.
- [21] Zhang Qingmei, Zhu Daqing. Effect of patterned board configuration on luminous and chromatic performance for COB packaged LED[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2014, 35(10):1276-1282.
- [22] 盛立军. TiO<sub>2</sub>掺杂浓度对倒装白光数码管光色性能的影响[J]. 光电子·激光, 2017, 28(11):1186-1190.
- [17] Yang S, Wang M, Jiao L, et al. Image fusion based on a new contourlet packet[J]. Information Fusion, 2010, 11(2):78-84.
- [18] Wang L, Li B, Tian L. EGGDD: An explicit dependency model for multi-modal medical image fusion in shift-invariant shearlet transform domain[J]. Information Fusion, 2014, 19:29-37.
- [19] 马淑兰, 常莉红, 马保科. 基于四元数小波变换和自适应神经网络的图像融合处理[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2020, 35(2):113-119.
- [20] Luo X, Zhang Z, Wu X. A novel algorithm of remote sensing image fusion based on shift-invariant Shearlet transform and regional selection[J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2016, 70(2):186-197.
- [21] Luo X, Zhang Z, Zhang B, et al. Image fusion with contextual statistical similarity and nonsubsampling shearlet transform[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 6:1.
- [22] Zong J, Qiu T. Medical image fusion based on sparse representation of classified image patches[J]. Biomedical Signal Processing and Control, 2017, 34:195-205.
- [23] Liu G, Lin Z, Yu Y. Robust subspace segmentation by low-rank representation[C]. Int'l Conf. Machine Learning, Haifa, Israel, 2010:663-670.
- [24] Liu G, Yan S. Latent low-rank representation for subspace segmentation and feature extraction[C]. 2011 International Conference on Computer Vision, IEEE, Barcelona, Spain, 2011:1615-1622.
- [25] Tomasi C, Manduchi R. Bilateral filtering for gray and color images[C]. Sixth International Conference on Computer Vision (IEEE Cat. No. 98CH36271), IEEE, Bombay, India, 1998:839-846.
- [26] Hu J, Li S. The multiscale directional bilateral filter and its application to multisensor image fusion[J]. Information Fusion, 2012, 13(3):196-206.
- [27] Kumar B K. Image fusion based on pixel significance using cross bilateral filter[J]. Signal, Image and Video Processing, 2015, 9(5):1193-1204.
- [28] 周志强, 汪渤, 李立广. 基于双边与高斯滤波混合分解的图像融合方法[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(1):8-13.
- [29] 刘峰, 沈同圣, 马新星. 交叉双边滤波和视觉权重信息的图像融合[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(4):9.
- [30] Li H, Wu X J. Infrared and visible image fusion using latent low-rank representation[J]. arXiv preprint arXiv, 2018:1804.08992.
- [31] Zhang M, Gunturk B K. Multi-resolution bilateral filtering for image denoising[J]. IEEE Transaction Image Process, 2008, 17(12):2324-2333.
- [32] Naidu V P S. Image fusion technique using multi-resolution singular value decomposition[J]. Defence Science Journal, 2011, 61(5):479.

### (上接第 317 页)