

# 体散射光扩散板的透射率与扩散率

唐振方<sup>1</sup> 叶 勤<sup>1</sup> 严启臻<sup>1</sup> 赵亭亭<sup>1</sup> 卫 红<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>暨南大学物理学系, 广东 广州 510632  
<sup>2</sup>广州市光机电技术研究院, 广东 广州 510663)

**摘要** 光散射材料的透射率和扩散率是一对矛盾的技术指标。建立了体散射型光扩散板的数值模型,采用米氏散射理论和蒙特卡罗数学方法,对多重光散射传导过程进行仿真模拟和统计分析,系统定量研究了影响透射率和扩散率的主要因素,包括掺杂散射粒子种类(相对折射率)、粒径、浓度等材料结构参数以及板厚、光源波长。得到了同时获得高透射率和高扩散率的光散射材料的技术路径,并给出理论解释。研究结果表明,其首要前提是选择合适相对折射率的掺杂粒子,优选范围为 0.91~0.97 或 1.03~1.09,其次是优选掺杂粒子粒径、浓度及板厚,可进一步精确调整透射率和扩散率,抑制和消除波长色散,满足特定应用领域的需要。研究结果对于开发高效光散射材料具有实践指导意义。

**关键词** 散射;体散射;光扩散板;透射率;扩散率;数值模拟

**中图分类号** TN204; TM923.01 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.s206001

## Transmittance and Diffusivity of Volumetric Light Diffusers

Tang Zhenfang<sup>1</sup> Ye Qin<sup>1</sup> Yan Qizhen<sup>1</sup> Zhao Tingting<sup>1</sup> Wei Hong<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Department of Physics, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China  
<sup>2</sup>Guangzhou Research Institute of Opto-Electro-Mechanical Technology, Guangzhou, Guangdong 510663, China)

**Abstract** The transmittance and diffusivity are two key issues for light scattering materials but showing fairly sharp contradictions. A theoretical and computational model is derived to describe the volumetric diffusers based on multiple Mie scattering theory and Monte-Carlo methods. The scattering transmission processes of photons are simulated with statistic calculation to optimize the correlation between the optical performances and parameters, including relative refractive index, size, concentration of doped particles, geometrical structure of diffusers, and wavelength of the illumination source. It is found that, relative refractive index is the most sensitive parameter in above to get perfect diffusers, the optimized values are 0.91~0.97 or 1.03~1.09. The wavelength dispersion of transmittance and diffusivity can be fatherly eliminated and suppressed to meet the needs of practical applications.

**Key words** scattering; volume scattering; light diffuser; transmittance; diffusivity; numerical simulation

**OCIS codes** 290.4020; 190.5890; 160.4670; 160.5470

## 1 引 言

光扩散板是使入射光束光强在空间一定范围内均匀分布的光学器件,在平板显示、照明工程、激光、投影成像等技术领域有重要应用<sup>[1,2]</sup>。现今随着大功率发光二极管(LED)芯片制造技术的日趋成熟,已开始广泛应用于LED-TV背光照明及LED室内外照明<sup>[3,4]</sup>。大功率LED光源为强指向性高温光源,为了提高光强均匀性和光学利用效率,抑制和消除眩光,对光扩散板提出了更高的要求。透射率和

扩散率是光扩散板的两个主要却矛盾的技术指标,开发双高指标的光扩散板成为当前光散射材料研究的热点问题<sup>[5~7]</sup>。

体散射型扩散板在聚合物基质材料中掺杂折射率不同的微珠,达到了光散射的目的,但因影响光散射材料性能的参数较多,光散射过程较为复杂,实验筛选工作量大<sup>[8,9]</sup>。本文基于多重米氏散射理论和蒙特卡罗数学方法,对体散射型光扩散板进行了光学建模和仿真模拟,提出体散射型光扩散板的材料

收稿日期: 2012-05-24; 收到修改稿日期: 2012-07-05

基金项目: 广州市科技攻关计划项目(11C43010793,12A52071614)资助课题。

作者简介: 唐振方(1969—),男,博士,副教授,主要从事光电子材料与器件方面的研究。E-mail: ttangzf@jnu.edu.cn

结构设计方法以及获得双高性能指标的技术路径<sup>[10~12]</sup>。这种严格按照理论模型制得的光散射材料属于聚合物光子学材料<sup>[13]</sup>,具有精确可控的材料结构参数和光学性能。

## 2 理论基础

掺杂微珠粒径在亚微米及微米量级时对光形成较强的散射,属于米氏散射理论的适用范围,可得到严格数学解。体散射光扩散板中的光传导过程属于多重米氏散射问题,采用蒙特卡罗顺序抽样的方法,引入散射概率密度函数和自由程的概念,可对

扩散板中的每一个光子进行追迹,分析统计大量光子的行为就可以获得扩散板光学特性与其结构参数的关系<sup>[14,15]</sup>。

当散射粒子的粒度和光波波长接近时,根据米氏散射理论,在散射角为 $\theta$ 、距离粒子 $r$ 处的散射光强为

$$I = \left( \frac{\lambda}{2\pi r} \right)^2 I_0 \frac{(i_1 + i_2)}{2}, \quad (1)$$

式中 $I_0$ 为初始光强。散射系数为

$$K(a) = \frac{2}{a^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2), \quad (2)$$

其中,

$$\begin{cases} i_1 = \left| \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} \left\{ a_n \frac{dP_n(\cos\theta)}{d\cos\theta} + b_n \frac{dP_n^{(1)}(\cos\theta)}{d\theta} \right\} \right|^2 \\ i_2 = \left| \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} \left\{ a_n \frac{dP_n^{(1)}(\cos\theta)}{d\theta} + b_n \frac{dP_n(\cos\theta)}{d\cos\theta} \right\} \right|^2 \end{cases}, \quad (3)$$

又有

$$L_0 = \frac{4}{\pi D^2 N K} = \frac{2D}{3KC}, \quad (9)$$

$$\begin{cases} a_n = \frac{\varphi_n(a)\varphi_n'(ma) - m\varphi_n'(a)\varphi_n(ma)}{\zeta_n(a)\varphi_n'(ma) - m\zeta_n'(a)\varphi_n(ma)} \\ b_n = \frac{m\varphi_n(a)\varphi_n'(ma) - \varphi_n'(a)\varphi_n(ma)}{m\zeta_n(a)\varphi_n'(ma) - \zeta_n(a)\varphi_n(ma)} \end{cases}, \quad (4)$$

$$\begin{cases} \varphi_n = \left( \frac{z\pi}{2} \right)^{1/2} J_{n+1/2}(z) \\ \zeta_n = \left( \frac{z\pi}{2} \right)^{1/2} H_{n+1/2}^{(2)}(z) \end{cases}, \quad (5)$$

式中 $a$ 为粒子的尺寸参数( $a = \pi D/\lambda$ ), $D$ 为粒子直径, $\lambda$ 为光波波长, $P_n(\cdot)$ 为 $n$ 阶第一类勒让德函数, $P_n^{(1)}(\cdot)$ 为 $n$ 阶第一类缔合勒让德函数, $J_{n+1/2}(\cdot)$ 为半奇阶第一类贝塞尔函数, $H_{n+1/2}^{(2)}(\cdot)$ 为半奇阶第二类汉克尔函数。 $m = m_1 + im_2$ ,为散射粒子相对于基质的折射率。

式中 $N$ 为掺杂粒子数分数, $K$ 为散射系数[见(2)式], $C$ 为掺杂粒子浓度(体积分)。随机数 $x_1$ 和 $x_2$ 取值区间为 $[0,1]$ 。

## 3 光散射特性

光散射特性与材料结构参数密切相关,由于参数众多,相互制约,且多呈非单调变化关系,需事先搞清楚各参数对单粒子散射及多重散射基本特性的影响程度大小,才能对扩散板透射率与扩散率的模拟计算结果进行深入的分析与评估。

图1为相同折射率不同粒径的单粒子散射光强的角分布图, $\lambda = 550 \text{ nm}$ , $m = 1.58$ 。纳米及亚微米粒子存在相对较强的反向散射,随着粒径增大到微米级,散射光强集中于入射光正方向,反向和侧向散

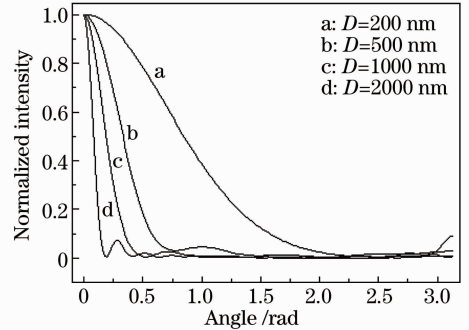


图1 不同粒径的单粒子散射光强的角分布  
Fig. 1 Angular intensity distributions of single particle with different diameters scattering

粒子对单位光强入射光散射后总的散射光强为

$$I = \int_0^{2\pi} 2\pi I(\theta) \sin\theta d\theta, \quad (6)$$

由此可得在 $\theta$ 方向上的散射概率密度函数为

$$F = \frac{\int_0^{\theta} 2\pi I(\theta) \sin\theta d\theta}{\int_0^{2\pi} 2\pi I(\theta) \sin\theta d\theta}. \quad (7)$$

散射光子的出射方向可由抽取随机数 $x$ 的方法获得,即 $\theta = F^{-1}(x_1)$ 。光子的自由程 $L$ 抽样公式为

$$L = -\ln(x_2)L_0, \quad (8)$$

其中, $L_0$ 为平均自由程,即

射迅速减弱,但并不会完全消失。米氏散射的前向散射特性,为获得高透射率提供了可能,也揭示了透射率和扩散率的基本矛盾所在。

图2为相同粒径不同相对折射率掺杂单粒子散射光强度积分分布图, $\lambda=550\text{ nm}$ , $D=2\text{ }\mu\text{m}$ 。此处采用积分强度可以对前向和后向散射光强的分布及占比有一个总体的认识,对于图中4种高低不同的相对折射率,80%以上的前向散射光光强均集中在 $0.3\text{ rad}$ 角度内。掺杂粒子的折射率偏离基质折射率越大,反向散射光越强。当相对折射率取1.84的高值时,单粒子反向散射光强占比高达15%左右。

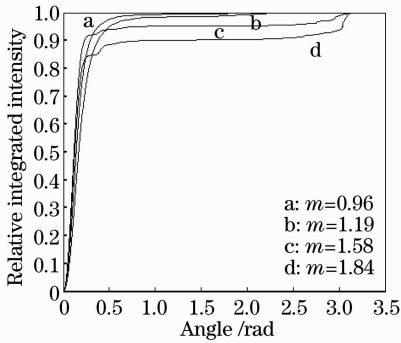


图2 不同相对折射率单粒子散射光强度积分分布

Fig. 2 Angular integrated intensity distributions of single particle with different refractive indexes scattering

图3为不同光源波长下,单粒子散射系数随粒径的变化关系曲线, $m=0.96$ 。散射系数代表掺杂粒子对光的散射能力,纳米粒子及亚微米粒子的散射能力较弱。随着粒径增大,散射系数快速增大,达到峰值后开始减小,然后呈波浪状起伏变化。不同波长光子的散射系数峰值对应不同的粒径。在峰值区域,粒径较小时,短波光散射系数较大,粒径较大时,长波光散射系数较大。

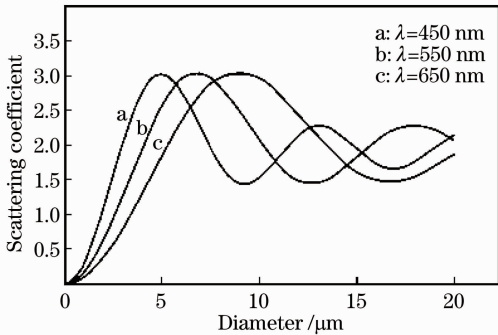


图3 不同光源波长下单粒子散射系数随粒径的变化关系

Fig. 3 Scattering coefficient versus diameter of single particle under light sources with different wavelengths

图4为相同掺杂浓度下多重散射平均自由程与粒径的关系, $\lambda=550\text{ nm}$ , $m=0.96$ , $C=0.6\%$ 。由(8)式可知,平均自由程与掺杂浓度及单粒子散射系数成反比,掺杂浓度越大,平均自由程越小,光子的散射次数越多。相同浓度下,粒径为纳米和亚微米量级时,散射系数很小,平均自由程很大,光子被散射的几率很低。随着粒径增大至微米量级,平均自由程快速下降,光子被散射的次数大大增加。但随着粒径的进一步增大,散射系数相对稳定,由(9)式可知,平均自由程增加,散射次数随之下降。

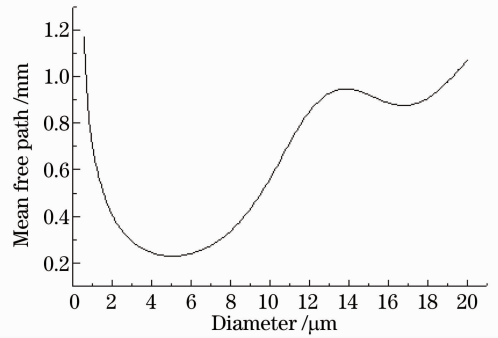


图4 多重散射平均自由程与粒径的关系

Fig. 4 Mean free path versus diameter of doped particles

## 4 数值计算结果与讨论

透射率定义为透过扩散板的透射光总光通量和入射光通量之比,扩散率指平行入射光穿透扩散板后偏离原方向的散射光光通量与透射光总光通量之比,参考雾度的定义<sup>[16]</sup>,将此散射偏离角定义为 $\pm 2.5^\circ$ 。模拟计算时,采用理想的激光光源,束斑直径为 $1.0\text{ cm}$ ,垂直入射到 $15\text{ cm}\times 15\text{ cm}$ 的扩散板上,接光面大小为 $500\text{ cm}\times 500\text{ cm}$ ,与扩散板相距 $15\text{ cm}$ 。扩散板基质材料以光学级聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)聚合物为例,考虑基质的折射率色散,忽略基质材料自身的杂质及大分子散射。扩散板为光滑表面,存在菲涅耳反射。假定球形均一粒径的掺杂粒子均匀、随机、无序、单分散于基质中,分别讨论扩散板材料结构参数、板厚及光源波长对透射率和扩散率的影响。

### 4.1 相对折射率

掺杂粒子相对于基质材料的折射率是扩散板材料设计的关键参数,图5给出了掺杂粒子相对折射率与扩散板透射率及扩散率的关系, $\lambda=550\text{ nm}$ ; $D=4\text{ }\mu\text{m}$ ; $C=0.3\%$ ,板厚 $T=1\text{ mm}$ 。掺杂粒子折射率与基质相同时,即纯基质材料制得的扩散板具有理论上最高的透射率92%和最低的扩散率0%。

随着二者折射率差异的增大,透射率刚开始平缓下降,之后较快下降。而扩散率刚开始快速上升,经过两侧尖峰峰值后,略有下降,然后呈波浪状起伏。由图 2 可知,折射率之差越大,反向散射光强的占比越大,透射率越低,与图 5 所得结果一致。所以折射率之差越小越好。而扩散率则需要折射率之差不能太小,综合两者对折射率之差的要求,相对折射率取值优选范围为 0.91~0.97 或 1.03~1.09。

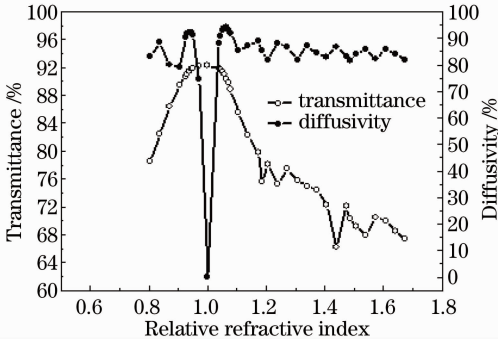


图 5 透射率与扩散率随掺杂粒子相对折射率的变化  
Fig. 5 Transmittance and diffusivity versus relative refractive index of doped particles

选择合适相对折射率是同时获得较高透射率和扩散率的首要前提条件,图 5 的模拟计算结果与文献[8,9]中采用不同相对折射率掺杂粒子的实验研究结果基本一致,常见的无机陶瓷掺杂粒子如  $Al_2O_3$ ,  $ZrO_2$ ,  $TiO_2$  等具有过高的折射率,难以获得较高的透射率。硅微粉( $SiO_2$ )、碳酸钙( $CaCO_3$ )、硫酸钡( $BaSO_4$ )和一些聚合物粒子(如聚硅氧烷微球)与聚合物基质折射率较为匹配,可以获得较高的透射率。而对于某些基质材料,符合聚合物共混要求且折射率匹配的掺杂粒子难以找到,可采取折射率过渡的核壳层结构粒子掺杂来获得较高的透射率<sup>[17,18]</sup>,其理论分析与计算方法尚有待建立。

#### 4.2 粒 径

对于相对折射率已给定的掺杂粒子,粒径和掺杂浓度的选择也十分重要。图 6 为透射率与扩散率随掺杂粒子粒径的变化关系, $\lambda=550\text{ nm}$ ,  $m=0.96$ ;  $C=0.6\%$ ;  $T=1\text{ mm}$ 。相同掺杂粒子浓度下,纳米及亚微米粒子的透射率和扩散率都不高。粒径在微米量级时,随着粒径增加,透射率一直缓慢增加,而扩散率先快速增加,到达一个平台峰值后又开始下降。综合前述米氏光散射基本特性,不难做出解释。掺杂粒子粒径较小时,反向散射相对光强较大(见图 1),导致透射率不高,尽管其散射角大,但散射系数小(见图 2),散射次数少(见图 4),导致扩散率不

高。当粒径增大到微米量级时,反向散射相对光强不断减小,所以透射率不断增加。而扩散率的表现则更为复杂,粒径开始增加时,散射系数(见图 3)和散射次数迅速增加,导致扩散率快速增加。粒径再次增大时,散射次数开始减小,散射系数呈波浪状变化,散射光强越来越更加集中于正前向,所以扩散率反而下降了。扩散率平台峰值区域对应的粒径范围与散射系数及平均自由程峰值区域对应的粒径范围基本一致。

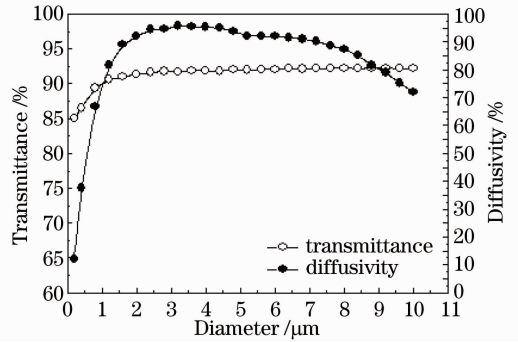


图 6 透射率与扩散率随粒径的变化关系  
Fig. 6 Transmittance and diffusivity versus diameter of doped particles

#### 4.3 掺杂粒子浓度

图 7 为透射率与扩散率随掺杂粒子浓度的变化关系, $\lambda=550\text{ nm}$ ;  $D=2\text{ }\mu\text{m}$ ;  $m=0.96$ ,  $T=1\text{ mm}$ 。随着浓度的增加,平均自由程减小,散射次数增加,透射率不断下降,扩散率不断增加。如果选用合适折射率和粒径的掺杂粒子,较低掺杂浓度(1.0%)即可获得非常高的扩散率,接近理论极限值 100%,而透射率仍能保持很高(89%),仅比未掺杂的 PMMA 纯料透射率降低约 3%。这是因为合适的相对折射和粒径下,单粒子反向散射极弱(见图 2),虽然散射次数增加,其累积效应仍然很小。

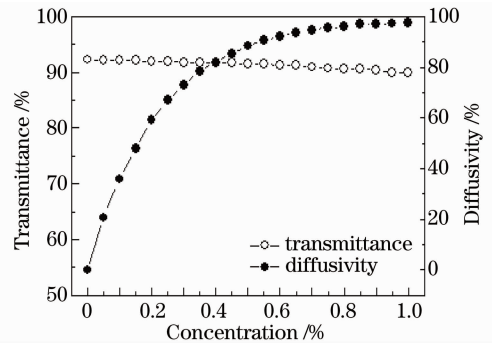


图 7 透射率与扩散率随掺杂浓度的变化关系  
Fig. 7 Transmittance and diffusivity versus concentration of doped particles

#### 4.4 板厚

图8为透射率与扩散率随扩散板板厚的变化关系,  $\lambda=550\text{ nm}$ ;  $D=4\ \mu\text{m}$ ;  $C=0.6\%$ ,  $m=0.96$ 。与掺杂粒子浓度的影响比较相似。随板厚增加, 散射次数增加, 透射率下降, 扩散率上升, 两者的乘积在板厚为2~3 mm时达到最大值。

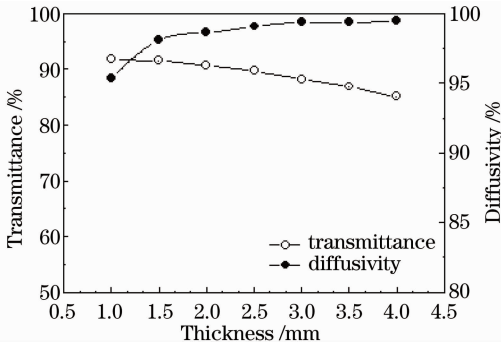


图8 透射率与扩散率随板厚的变化关系  
Fig. 8 Transmittance and diffusivity versus thickness of light diffuser plates

#### 4.5 光源波长

图9为掺杂不同粒径粒子后, 透射率和扩散率随光源波长的变化关系,  $m=0.96$ ,  $C=0.6\%$ ,  $T=1\text{ mm}$ ;  $D=4, 8\ \mu\text{m}$ 。在可见光全波段, 如果选用合适相对折射率的掺杂粒子, 透射率随波长、粒径和浓度的变化皆不显著。粒径增加, 长波光透射率略有上升; 浓度增加, 全波段透射率轻微下降。皆因微米级粒子的反向散射极弱, 趋近于零, 其减小幅度和累积效应都不会大。而如果相对折射率选择不合理, 过小或过大, 反向散射光强占比较大, 透射率随波长增加有较大幅度的上升, 白光光束透过扩散板后偏色严重, 呈明显的黄色。

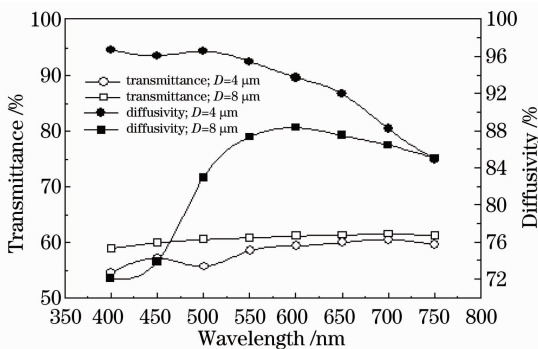


图9 透射率和扩散率随光源波长的变化关系  
Fig. 9 Transmittance and diffusivity versus wavelength of illumination source

粒径较小时, 短波光的散射系数大(见图3), 短波光具有较高的扩散率。而随着粒径的增大, 长波光散射系数大, 导致长波光扩散率增加。再加上

PMMA 基质折射率的波长色散, 导致相对折射率随波长不同而变化。同时, 单粒子散射光强角分布也与入射光波长相关(见图1)。多重因素共同作用的结果显示, 扩散率随波长的变化行为有时呈现复杂行为。扩散率随波长不同而变化可以通过混合填充不同粒径的粒子来抑制(见图3)。由于混光效应的存在, 在一般应用领域, 扩散率色散问题并不严重, 以致于无需特别关注, 但对于空间色均衡性要求较高的应用场合, 仍需予以重视。

## 5 结论

采用多重米氏散射理论和蒙特卡罗数学方法, 建立了体散射光扩散板的定量模拟分析方法, 追踪光子的传导径迹, 得到单粒子散射和多重散射的一些基本特性和规律。通过大量的数值计算, 系统研究了透射率与扩散率与掺杂粒子相对折射率、粒径、浓度等材料结构参数以及扩散板板厚、光源波长的相关关系, 给出了协调各参数之间矛盾的方法和思路。找到了获取光扩散板最好性能指标的技术路径。建立的光散射材料设计方法及研究结果与已有实验结果相当吻合, 可推延至其他透明聚合物基质材料, 如聚碳酸酯(PC)、聚苯乙烯(PS)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET), 对实验研究和产品开发具有一定的指导意义。

## 参考文献

- 1 G. H. Kim. A PMMA composite as an optical diffuser in a liquid crystal display backlight unit (BLU) [J]. *European Polymer Journal*, 2005, **41**(8): 1729~1737
- 2 H. P. Kuo, M. Y. Chuang, C. C. Lin. Design correlations for the optical performance of the particle-diffusing bottom diffusers in the LCD backlight unit [J]. *Powder Technology*, 2009, **192**(1): 116~121
- 3 G. Park, Y. G. Kim, J. Hoon Yi *et al.*. Enhanced of the optical performance by optimization of optical sheets in direct illumination: LCD backlight [J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2009, **13**(1): 152~157
- 4 B. T. Liu, Y. T. Teng. A novel method to control inner and outer haze of an anti-glare film by surface modification of the light scattering particles [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2010, **350**(2): 421~426
- 5 G. H. Kim, W. J. Kim, S. M. Kim *et al.*. Analysis of the thermo-physical and optical properties of a diffuser using PET/PC/PBT copolymer in LCD backlight units [J]. *Displays*, 2005, **26**(1): 37~43
- 6 Guo Mei, Xiong Ying, Xu Peng *et al.*. The morphology and optical of the PET optical diffusion films [J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2010, **26**(2): 54~57
- 郭梅, 熊英, 徐鹏等. PET光散射薄膜的微观形态调态与光学性能 [J]. *高分子材料科学与工程*, 2010, **26**(2): 54~57
- 7 S. I. Chang, J. B. Yoon, H. Kim *et al.*. Microlens array diffuser for a light-emitting diode backlight system [J]. *Opt.*

- Lett., 2006, **31**(20): 3016~3018
- 8 Jui-Hao Wang, Shui-Yang Lien, Jeng-Rong Ho *et al.*. Optical diffusers based on silicone emulsions [J]. *Optical Materials*, 2009, **32**(2): 374~377
- 9 Meng Qinghua, Guo Anru, Zhang Yongjie *et al.*. Lighting scattering property of PS/PMMA compounds [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(11): 2646~2650  
孟庆华, 郭安儒, 张勇杰等. PS/PMMA 复合材料的光散射[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(11): 2646~2650
- 10 C. C. Sun, W. T. Chien, I. Moreno *et al.*. Calculating model of light transmission efficiency of diffusers attached to a lighting cavity[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(6): 6137~6148
- 11 F. Gonzalez, G. Videen, P. J. Valle *et al.*. Light scattering computational methods for particles on substrates[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radioactive Transfer*, 2001, **70**(4): 383~393
- 12 G. Park, T. S. Aum, J. H. Kwon *et al.*. Characterization and modeling light scattering in diffuser sheets[J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2009, **54**(1): 44~48
- 13 Y. Koike. Microoptics and photonics polymer [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2008, **47**(8): 6629~6634
- 14 Ye Qin, Tang Zhenfang, Ma Changqun *et al.*. Ray tracing simulation of volume scattering light guide plate for LCD[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(11): 1627~1631  
叶勤, 唐振方, 马常群等. 体散射液晶导光板的光线追迹模拟[J]. *光学学报*, 2006, **26**(11): 1627~1631
- 15 Ma Changqun, Tang Zhenfang, Zhang Jie *et al.*. Monte Carlo simulation of light multiple scattering in polymers[J]. *Chinese Journal of Computational Physics*, 2007, **24**(4): 457~462  
马常群, 唐振方, 张杰等. 聚合物中多重光散射传导的 Monte Carlo 数值模拟[J]. *计算物理*, 2007, **24**(4): 457~462
- 16 Determination of the Luminous Transmittance and Haze of Transparent Plastics. GB/T 2410-2008. [S]. Beijing: China Standard Press, 2008  
GB/T 2410-2008 透明塑料透光率和雾度的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008
- 17 M. Hongda. Light Diffusing Agent Light Diffusing Sheet, and Nonglare Sheet[P]. United States Patent, 6963447 B2, 2004
- 18 Lu Xin, Xin Zhong. Preparation, characterization and application as light scattering agents of microsize polystyrene/polysiloxane core/shell microspheres[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2006, **57**(4): 959~963  
陆馨, 辛忠. 微米级聚苯乙烯/聚硅氧烷核壳微球的制备、表征及其作为光散射剂的应用[J]. *化工学报*, 2006, **57**(4): 959~963

栏目编辑: 马 沂