

光学学报

基于多角度散斑曝光实现大散射角全息扩散片的制备

杨朝雄^{1,2}, 江海波^{1*}, 孙秀辉¹, 刘毅³, 杨正¹, 房启鹏^{1,2}, 尹韶云^{1,2*}

¹中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 400714;

²中国科学院大学, 北京 100049;

³重庆京东方光电科技有限公司, 重庆 400714

摘要 光学扩散片是液晶显示器中的关键元件,兼具广角、高透过率、高均匀性的扩散片一直是液晶显示领域的重要研究目标。基于 Helmholtz-Kirchhoff 理论,推导了激光透过粗糙表面的散斑强度频谱分布,提出通过特定入射角度的多个光束依次照射粗糙表面形成散射场叠加曝光的全息扩散片设计方法。该方法拓宽了全息扩散片的散射角度,提升了散射强度的均匀性。搭建了全息扩散片的制作光路,采用上述方法制作了全息扩散片,测量获得的远场强度分布与仿真结果能很好地吻合,散射角的半峰全宽达到 130°,透过率达到 90%以上,扩散系数达到 92%,同时实现了广角、高透过率和高亮度均匀性,在液晶显示中具有潜在的应用前景。

关键词 全息; 散斑; 大角度; 散射

中图分类号 O436 文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1609001

Fabrication of Holographic Diffuser with Large Scattering Angle Realized by Multi-Angle Speckle Exposure

Yang Chaoxiong^{1,2}, Jiang Haibo^{1*}, Sun Xiuhui¹, Liu Yi³, Yang Zheng¹,
Fang Qipeng^{1,2}, Yin Shaoyun^{1,2*}

¹Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences,
Chongqing 400714, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³Chongqing BOE Optoelectronics Technology Co., LTD., Chongqing 400714, China

Abstract Optical diffusers are key components in liquid crystal displays (LCDs). Diffusers with wide angles, high transmittance, and great uniformity have always been an important research goal in the LCD field. Based on the Helmholtz-Kirchhoff theory, the spectral distribution of speckle intensity for laser passing through a rough surface is derived. A design method for holographic diffusers is proposed, which is based on the superposition exposure of scattering fields formed by multiple beams at specific incident angles irradiating a rough surface in turn. This method broadens the scattering angle of holographic diffusers and improves the uniformity of scattering intensity. The fabrication path to holographic diffusers is made and holographic diffusers are fabricated by the proposed method. The far-field intensity distribution measured by this method is in good agreement with the simulation results. The full width at half maximum (FWHM) of scattering angles reaches 130°; the light transmittance is more than 90%, and the diffusion coefficient is as high as 92%. In addition, wide angles, high transmittance, and great brightness uniformity are realized. This method has potential application prospects in LCDs.

Key words holography; speckle; large angle; scattering

OCIS codes 090.6186; 090.2890; 050.1960

收稿日期: 2021-01-26; 修回日期: 2021-03-01; 录用日期: 2021-03-18

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB1002902)、国家自然科学基金(61475199)、重庆市科技局(cstc019jcsx-mbdxX0019)

通信作者: *ysy@cigit.ac.cn; **jianghaibo@cigit.ac.cn

1 引言

光学扩散片是液晶显示器(LCD)中实现大角度、均匀背光的关键光学元件^[1-8]。LCD背光中使用的常规光学扩散片是通过微颗粒涂敷工艺制造的,扩散片的散射特性由微粒的密度和微粒的大小决定^[9],这种扩散片的角亮度均匀性和透过率两个关键指标相互制约^[10],实际使用中往往需要牺牲较多的亮度以实现均匀的显示视角。

基于激光散斑原理的全息扩散片具有90%以上的高透过率,能够对入射光进行定向散射,同时能够提升所需视角范围内的显示亮度,在光束整形、投影显示等领域具有广泛的应用^[11-16]。全息扩散片是将激光照射随机粗糙表面产生的散斑,记录在光刻胶上或体全息材料中^[17-20],形成散斑全息图,其原理是利用光的衍射和折射性质,而非粒子散射特性,故全息扩散片的透过率非常高,散射角度可以通过全息记录过程进行控制,制作过程简单,并能采用滚动复制方法实现规模化制造,故在LCD背光领域具有非常强的应用潜力。

国内关于全息扩散片的研究报道较少,但国外学者很早就开始了相关研究,并发展了较成熟的制作工艺。Lu等^[21]采用单光束照射磨砂玻璃形成远场散斑来制作全息扩散片,通过控制狭缝尺寸、曝光间距和曝光时间来控制散斑微结构尺寸和形状,实现散射角度的灵活控制。Ganzherli等^[17]采用卤化银乳剂作为全息记录介质制作全息扩散片,理论和实验验证最大散射角度与通光孔径尺寸和衍射距离的比值呈正比例关系,但散射角的半峰全宽(FWHM)只能控制在 $0^\circ \sim 8^\circ$ 。Wavefront Technology公司的Qi等^[19,22]通过控制全息记录过程,来控制全息扩散片表面的类透镜微结构的平均焦距和尺寸,散射角的FWHM可以控制在 $0.5^\circ \sim 80^\circ$ 。Luminit公司的研究人员^[20,23]利用光学曝光制作表面全息结构和体全息结构的全息扩散片,这类扩散片形成的散射光可将散射角的FWHM控制在 $1^\circ \sim 100^\circ$ 。以上全息扩散片的制作方法受限于毛玻璃低的散射频谱,形成的散斑特征尺寸较大, 120° 以上大散射角度的全息扩散片还未见报道。

本文基于Helmholtz-Kirchhoff理论,分析了激光束的入射角度对随机粗糙表面平均散射强度的影响,提出基于多角度光束非相干叠加曝光实现大角度均匀散射光分布的全息扩散片制作的方法,并搭建曝光光路,制作了不同入射角非相干叠加曝光下的全息扩散片。下面将详细介绍大角度全息扩散片的设计原理及制备方法。

2 设计原理

全息扩散片是基于全息原理在全息介质中记录激光照射随机粗糙表面时形成散斑场的元件。全息扩散片的散射光强度分布为全息介质中接收到的散射光频谱的再现,通过控制粗糙表面通光孔径的尺寸、全息介质与粗糙表面的间距,可实现扩散片散射强度的控制。平面波垂直照射随机粗糙表面后的平均散射光强分布呈高斯型,因此形成的全息扩散片的散射光强分布同样为高斯分布。采用多个光束以不同角度分别照射粗糙表面,倾斜入射将造成散射场频谱的平移,平移量与入射角度相关,散射场类高斯状频谱的平移叠加是形成大角度均匀散射的主要原因。

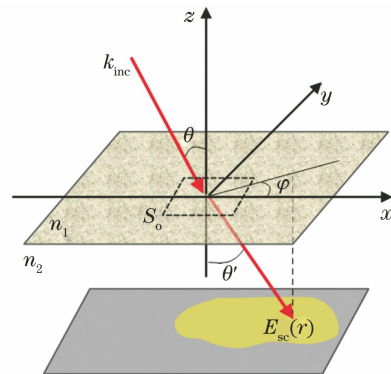


图1 随机粗糙表面的散射过程

Fig. 1 Light scattering of random rough surface

如图1所示,一束激光以角度 θ 入射到随机粗糙表面,光束与粗糙表面的相交截面为 S_0 ,当磨砂玻璃的表面相关长度远大于入射激光的波长时,可通过Helmholtz-Kirchhoff标量衍射理论获得粗糙表面散射场在 (θ', φ) 方向的电场 $E_{sc}(r, \theta', \varphi)$ ^[24-26],表达式为

$$E_{sc}(r, \theta', \varphi) = \frac{ik \exp(ikn_1 r)}{4\pi r} \iint_{S_0} \left(a \frac{\partial h}{\partial x} + b \frac{\partial h}{\partial y} - c \right) \times \exp\{ik[Ax + By + Ch(x, y)]\} dx dy, \quad (1)$$

式中: $h(x, y)$ 是毛玻璃表面 (x, y) 位置处的高度; r 是随机粗糙表面与记录散斑的平面之间的距离; n_1

为粗糙表面介质的折射率;其他参数定义为

$$\begin{aligned} A &= n_1 \sin \theta - n_2 \sin \theta' \cos \varphi, \quad B = -n_2 \sin \theta' \sin \varphi, \\ C &= -n_1 \cos \theta + n_2 \cos \theta' \\ a &= -T_0 \left(n_2 \sin \theta' \cos \varphi + \frac{n_1^2 \sin \theta \cos \theta}{n_2 \cos \theta_{\text{spec}}} \right), \\ b &= -T_0 n_2 \sin \varphi \sin \theta' \\ c &= T_0 (n_2 \cos \theta' + n_2 \cos \theta_{\text{spec}}), \quad n_1 \sin \theta = n_2 \sin \theta_{\text{spec}}, \end{aligned} \quad (2)$$

其中, n_2 为粗糙表面周围介质的折射率, θ' 是散射光线与 z 轴的夹角, φ 是散射光线的方位角, λ 是真空中波长, $k = 2\pi/\lambda$, T_0 是粗糙表面的透过率系数, θ_{spec} 为入射光线透过粗糙表面的折射角。

对于表面相关长度为 β 、高度分布为高斯分布的粗糙表面,以不同入射角度 θ_m 的激光束照射粗糙表面,每束散射光的平均散射强度为

$$\begin{aligned} \langle I_m(r, \theta'_m, \varphi_m) \rangle &= \langle E_{\text{sc}}^{(m)} \cdot E_{\text{sc}}^{*(m)} \rangle = \frac{k^2 F_m^2 \beta_m^2}{4\pi r^2} \frac{1}{g_m} S_m \exp \left[-\frac{k^2 (A_m^2 + B_m^2) \beta_m^2}{4g_m} \right] = \\ &= \frac{k^2 F_m^2 \beta_m^2}{4\pi r^2} \frac{1}{g_m} S_m \exp \left\{ -\frac{n_2^2 \lambda^2 \beta^2 \left[\left(\frac{\sin \theta'_m \cos \varphi_m}{\lambda} - \frac{n_1 \sin \theta_m}{n_2 \lambda} \right)^2 + \left(\frac{\sin \theta'_m \sin \varphi_m}{\lambda} \right)^2 \right]}{4\delta^2 C_m^2} \right\}, \end{aligned} \quad (3)$$

式中: m 代表用于入射激光束的编号, $m = 1, 2, \dots$, N ; δ 、 β 分别是粗糙表面高度函数的方差和相关长度; $g_m = k^2 \delta^2 C_m^2$; S_m 是粗糙表面出射孔径的面积; $F_m = \frac{1}{2} [(A_m a_m / C_m) + (B_m b_m / C_m) + c_m]$; $A_m^2 + B_m^2 = n_2^2 \lambda^2 \left[\left(\frac{\sin \theta'_m \cos \varphi_m}{\lambda} - \frac{n_1 \sin \theta_m}{n_2 \lambda} \right)^2 + \left(\frac{\sin \theta'_m \sin \varphi_m}{\lambda} \right)^2 \right]$ 。采用同一激光器的 N 束激光,以不同入射角度依次照射粗糙表面,可得非相干叠加后总的平均散射强度为

$$I_{\text{total}} = \sum_m^N \langle I_m(r, \theta'_m, \varphi_m) \rangle. \quad (4)$$

根据(3)式和(4)式,可知粗糙表面与光刻胶之间的距离 r , 激光入射角 θ_m 以及粗糙表面的相关长度 β 和表面粗糙度 δ 都会影响全息扩散片的强度分布,其中入射角 θ_m 是非相干叠加后平均散射强度分布的主要影响因素,选择合适入射角度的多光束照射随机粗糙表面,非相干叠加后的平均散射强度可实现非常均匀分布。

图 2 给出了入射角度分别为 20° 、 -20° 和 0° 时的归一化平均散射强度分布曲线,以及叠加后的归一化平均散射强度分布曲线,图中 I_1, I_2, I_3 分别是以 $20^\circ, -20^\circ$ 和 0° 入射角照射高度均方根(RMS)为 $1.8 \mu\text{m}$ 的磨砂玻璃的归一化平均散射强度, I_4 是 I_1, I_2 和 I_3 三束光产生的散斑曝光形成的全息扩散片的归一化平均散射强度,粗糙表面参数为 $\beta = 1.95 \mu\text{m}$ 和 $\delta = 1.8 \mu\text{m}$, 散射距离 $r = 110 \text{ mm}$ 。从图 2 中可以看出,单个入射光束形成的散射场平均强度分布呈类高斯型, $\pm 20^\circ$ 入射相对于正入射情形

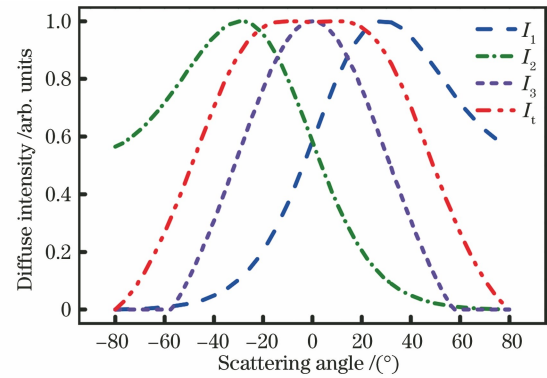


图 2 全息扩散片的平均散射强度随散射角度的分布曲线
Fig. 2 Distribution curves of average scattering intensity of holographic diffuser with scattering angle

下的散射场强度分布中心发生了偏移,三个散射场强度叠加后的强度分布呈较好的平顶分布,强度分布曲线的 FWHM 从 60° 增大到 100° , 散射角度有非常明显的提升。

3 实验与分析

为验证上述理论方法,搭建了如图 3(a)所示的全息扩散片制作光路,激光器选用波长为 325 nm 的 He-Cd 激光器,随机粗糙表面选用 240 目(240 目 = 0.061 mm)、仅有单个粗糙面的磨砂玻璃,全息记录介质选用 AZ4562 光刻胶。激光器发出的激光束经非球面镜和小孔空间滤波以及两个柱面镜($f_1 = 20 \text{ mm}$, $f_2 = 200 \text{ mm}$)扩束,依次以不同的角度照射磨砂玻璃的粗糙面,磨砂玻璃的散射光在光刻胶上形成的散斑被记录,如图 3(a)中的实线所示。其中入射角度可通过转动反射镜来调整,如图 3(a)中的虚线所示,光刻胶面同时移动使得每次形成的散

斑被记录在同一位置区域。制备的全息扩散片表面结构的扫描电镜图(SEM)如图 3(b)所示,微结构尺寸为 $10\ \mu\text{m}$ 。考虑到全息扩散片用于 LCD 背光领域,采用 $450\ \text{nm}$ 激光和 $650\ \text{nm}$ 激光进行散射光测试,以保证全息扩散片在可见光波段是适用的,如图 3(c)所示。由于散斑形成过程中孔径为矩形,因此全息扩散片表面微结构的长宽比不同,导致最终形成的光斑为椭圆形光斑。同时,因多角度入射光

叠加曝光发生在一个方向,故同一位置可记录更多的大角度分量,而在另外一个方向是相同角度散射光发生叠加,故扩散片的大角度方向出现角度扩展现象且光强分布呈平顶分布,而小角度方向的光强分布还是呈高斯分布。如图 3(c)所示,大角度方向是采用 $\pm 10^\circ$ 和 0° 三束散射光叠加形成的散射效果图,可以看到扩散片叠加曝光方向的散射角的 FWHM 得到扩展,且光强分布呈平顶分布。

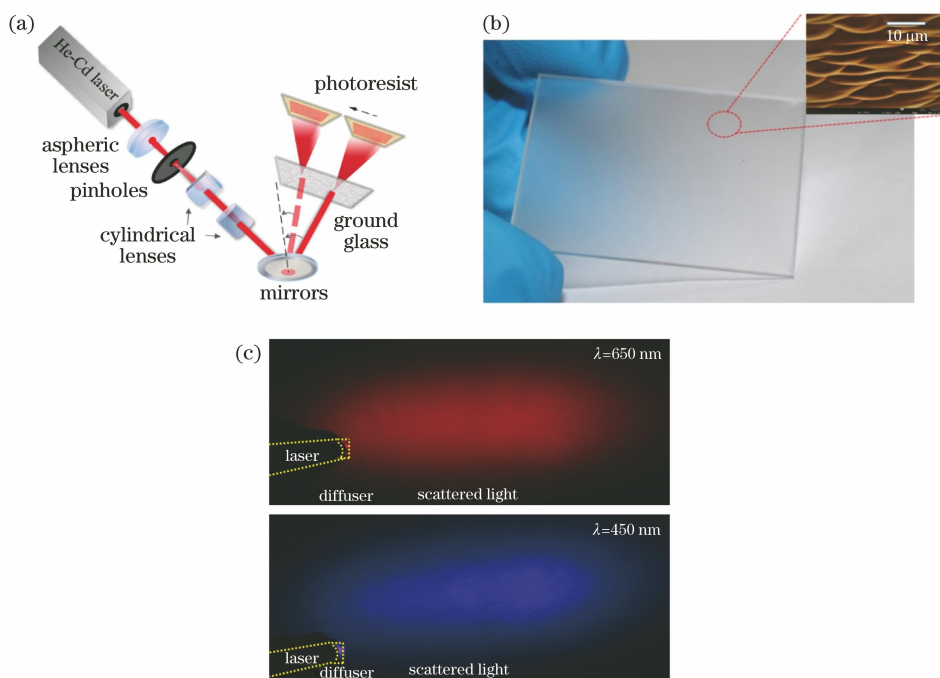


图 3 基于多角度曝光的全息扩散片的制备和测试。(a)制作扩散片的光路图;(b)扩散片实物图以及微结构 SEM 图;
(c)红光、蓝光照射的散射效果图

Fig. 3 Fabrication and test of holographic diffuser based on multi-angle exposure. (a) Light path of fabricating diffuser;
(b) photograph of holographic diffuser and SEM picture of microstructure; (c) scattering of red light and blue light irradiation

为定量说明全息扩散片的大角度平顶散射光,采用分布光度计(LED620 LED 分布光度计,远方公司 EVERFINE)对全息扩散片散射光的远场强度分布进行测量。实验时采用 $450\ \text{nm}$ 的蓝光半导体激光器,对入射角取值分别为 $\pm 10^\circ$ 、 $\pm 20^\circ$ 和 $\pm 25^\circ$ 与 0° 叠加进行 3 次曝光制作的 3 个样品进行了测试。由于叠加曝光只发生在一个方向,故仅给出该方向的散射光平均散射强度的测试结果,如图 4 中的实线所示,理论仿真结果如图 4 中的虚线所示。可以看出,理论值与实验值可以较好地吻合,随着入射角增大,全息扩散片的散射角增大,且对散射强度均匀性有非常明显的影响。

扩散片的强度均匀性可以采用扩散系数来定量描述^[10],其定义为

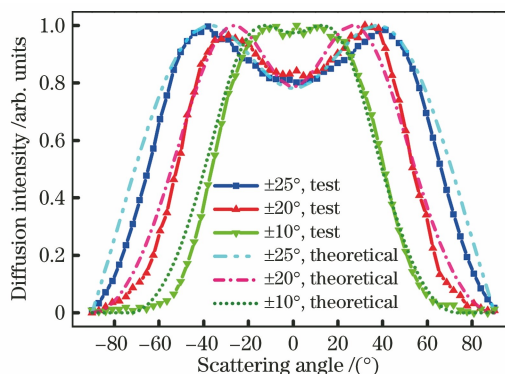


图 4 测试与理论仿真结果的对比图
Fig. 4 Comparison of test and theoretical results

$$R_D = (B_{70^\circ} + B_{20^\circ}) / 2B_{5^\circ}, \quad (5)$$

式中, $B_{\theta'}$ 是散射角 θ' 方向的亮度,扩散系数越大,强

度均匀性越好。根据图 4 的实验结果,可知在 3 种入射角度下制作的全息扩散片的散射角的 FWHM、扩散系数、透过率数据如表 1 所示。其中透过率是利用积分球(HAAS-2000 高精度快速光谱辐射计,远方公司 EVERFINE)测试所得。

表 1 全息扩散片的评价参数

Table 1 Evaluation parameters of holographic diffuser

Incident angle /($^{\circ}$)	25	20	10
FWHM /($^{\circ}$)	130	104	76
Diffusion factor /%	92	73	52
Light transmittance /%	92	92	92

对于在 LCD 中常用的颗粒状扩散片,根据文献[7],可知其扩散系数与透过率函数呈近似线性关系:当透过率达到 65%时,散射系数为 60%;透过率最大达到 70%时,散射系数为 40%;透过率越大,扩散系数越小,无法同时满足高均匀性和高效率的要求。根据表 1 的评价参数,可知本文提出的全息散射片,其透过率均可以达到 90%以上;且随着入射角度增大,其扩散系数增大;选择合适的入射角度,其扩散系数可以达到 92%,散射角的 FWHM 可达到 130°,能同时满足高均匀性和高效率的要求。相对于目前公开报道的同类全息扩散片^[17,21-22,27-28],散射角度的 FWHM 增加了约 30°。

4 结 论

基于 Helmholtz-Kirchhoff 理论,推导了不同角度下多个光束依次照射随机粗糙表面并经非相干叠加后的平均散射场强度分布,得出了激光束入射角度、粗糙表面的统计参数和非相干叠加次数等是全息扩散片散射强度分布的主要影响因素。实验上证明了理论仿真的正确性,并制备了透过率为 92%、扩散系数为 92%、半峰全宽为 130°的全息扩散片,其可用于 LCD 背光,提升了显示器的亮度及角亮度均匀性。

参 考 文 献

- [1] Park H G, Khang D Y. High-performance light diffuser films by hierarchical buckling-based surface texturing combined with internal pores generated from physical gelation induced phase separation of binary polymer solution[J]. *Polymer*, 2016, 99: 1-6.
- [2] Liu S J, Huang Y C, Yang S Y, et al. Rapid fabrication of surface-relief plastic diffusers by ultrasonic embossing [J]. *Optics & Laser Technology*, 2010, 42(5): 794-798.
- [3] Liu S J, Huang Y C. Manufacture of dual-side surface-relief diffusers with various cross angles using ultrasonic embossing technique[J]. *Optics Express*, 2009, 17(20): 18083-18092.
- [4] Zhu R D, Hong Q, Gao Y T, et al. Tailoring the light distribution of liquid crystal display with freeform engineered diffuser [J]. *Optics Express*, 2015, 23(11): 14070-14084.
- [5] Pyo B, Joo C W, Kim H S, et al. A nanoporous polymer film as a diffuser as well as a light extraction component for top emitting organic light emitting diodes with a strong microcavity structure [J]. *Nanoscale*, 2016, 8(16): 8575-8582.
- [6] He X L, Jiang Z L, Kong Y, et al. Fourier ptychography via wavefront modulation with a diffuser [J]. *Optics Communications*, 2020, 459: 125057.
- [7] Zhou L, Han C, Saeed M H, et al. A switchable optical diffuser based on a polymer/nematic liquid crystal composite film with transient polymer ball-networks microstructure [J]. *Liquid Crystals*, 2019, 46(15): 2213-2222.
- [8] Zhou L, Zhu Y F, Zhou Y, et al. Tunable broadband wavefronts shaping via chaotic speckle image holography carrier fringes [J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5(3): 1600810.
- [9] Ouyang X, Li P B, Chen D Z, et al. Light-diffusing materials for LED illumination applications: comparing the effectiveness of two typical light-diffusing agents [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2016, 133(4): 42923.
- [10] Kanemitsu A, Sakamoto T, Iyama H. Light diffuser plates for LCD-TV backlight systems [J]. *Sumitomo Kagaku Tokushugo (Sumitomo Chemical Review)*, 2007(1): 4-12.
- [11] Sakai D, Harada K, Kamemaru S I, et al. Direct fabrication of surface relief holographic diffusers in azobenzene polymer films [J]. *Optical Review*, 2005, 12(5): 383-386.
- [12] Piao M L, Kwon K C, Kang H J, et al. Full-color holographic diffuser using time-scheduled iterative exposure [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(16): 5252-5259.
- [13] Helseth L E, Singstad I. Diffusers for holographic stereography [J]. *Optics Communications*, 2001, 193(1/2/3/4/5/6): 81-86.
- [14] Liu Y C, Gong H J, Geng Z, et al. Research of light-field 3D imaging systems based on holographic directional scattering-screen [J]. *Laser &*

- Optoelectronics Progress, 2015, 52(10): 101103.
- 刘永春, 龚华军, 耿征, 等. 基于全息定向散射屏的光场三维成像系统研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(10): 101103.
- [15] Sang X Z, Yu X B, Chen D, et al. Research progress on three-dimensional optical display technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(5): 050006.
- 桑新柱, 于迅博, 陈铎, 等. 三维光显示技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(5): 050006.
- [16] Chen Z Y, Chen L, Fan W R, et al. Progress on scattering imaging technologies based on correlation holography[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(2): 0200001.
- 陈子阳, 陈丽, 范伟如, 等. 基于相关全息原理的散射成像技术及其进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(2): 0200001.
- [17] Ganzherli N M, Gulyaev S N, Maurer I A. The formation of phase relief structures during holographic diffuser recording on silver halide emulsions[J]. High Energy Chemistry, 2008, 42(7): 540-542.
- [18] Murphy K, Toal V, Naydenova I, et al. Holographic beam-shaping diffractive diffusers fabricated by using controlled laser speckle[J]. Optics Express, 2018, 26(7): 8916-8922.
- [19] Qi J, Petersen J, Rich C. Tailored elliptical holographic diffusers for LCD applications [J]. Journal of the Society for Information Display, 2005, 13(9): 781-786.
- [20] Jansson T, Arik E, Bennahmias M, et al. Performance metrics for integrated lighting systems [J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6225: 62251E.
- [21] Lu Y T, Chi S E. Fabrication of light-shaping diffusion screens[J]. Optics Communications, 2002, 214(1/2/3/4/5/6): 55-63.
- [22] Qi J, Rich C, Petersen J, et al. P-22: tailored holographic micro-diffusers for display applications [J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2004, 35(1): 314-317.
- [23] Jansson T, Arik E, Bennahmias M, et al. Brightness limitations in integrated lighting systems [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6558: 65580L.
- [24] Caron J, Lafait J, Andraud C. Scalar Kirchhoff's model for light scattering from dielectric random rough surfaces[J]. Optics Communications, 2002, 207(1/2/3/4/5/6): 17-28.
- [25] Salami M, Zamani M, Fazeli S M, et al. Two light beams scattering from a random rough surface by Kirchhoff theory [J]. Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, 2011, 2011(8): P08006.
- [26] Dashtdar M, Tavassoly M T. Transforming a spatially coherent light beam into a diffused beam of small diffusion angle using suitable surface scattering [J]. Optics Communications, 2013, 308: 7-10.
- [27] Edmund Optics. Holographic diffusers [EB/OL]. [2021-01-20]. <https://www.edmundoptics.cn/f/holographic-diffusers/11481/>.
- [28] Luminit. Luminit's 100° micro led diffuser for wearable and portable displays [EB/OL]. [2021-01-20]. https://www.luminitco.com/diffusing_micro_LEDs.