

文章编号 1004-924X(2026)01-0053-08

体散射片制备及静态激光散斑抑制

吴其洲¹, 贾 蓓¹, 陈亚琳², 燕宇翔², 马维光², 仝召民^{2*}

(1. 中北大学 信息与通信工程学院 极限环境光电动态测试技术与仪器全国重点实验室,
山西 太原 030051;

2. 山西大学 激光光谱研究所 光量子技术与器件全国重点实验室, 山西 太原 030006)

摘要:针对激光显示中因激光的高相干性所引起的散斑问题,提出一种基于聚苯乙烯(PS)微球与聚二甲基硅氧烷混合物的体散射片(Volume Scattering Diffuser, VSD),以用于静态激光散斑抑制。采用无皂乳液聚合法合成了平均粒径 600~700 nm 的 PS 微球,并通过旋涂法制备了不同厚度的 VSD。实验结果表明,当 VSD 旋涂速度从 1 300 r/min 降低至 600 r/min 时,VSD 的散射能力随其厚度的增加而增强,散射角从 44°升高至 100°。在光学测试系统中,较厚的 VSD 能更有效地破坏激光的时间和空间相干性,使散斑对比度降低至 0.35。本研究为激光显示系统提供了一种无需外部驱动、无噪音且高效的静态激光散斑抑制方案,具有重要的工程应用价值。

关键词:激光显示;激光散斑;体散射片;静态散斑抑制

中图分类号:O439 文献标识码:A

doi:10.37188/OPE.20263401.0053

CSTR:32169.14.OPE.20263401.0053

Fabrication of volume scattering diffuser and static laser speckle suppression

WU Qizhou¹, JIA Bei¹, CHEN Yalin², YAN Yuxiang², MA Weiguang², TONG Zhaomin^{2*}

(1. State Key Laboratory of Extreme Environment Optoelectronic Dynamic Measurement Technology and Instrument, School of Information and Communication Engineering,

North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. State Key Laboratory of Quantum Optics Technologies and Devices, Institute of Laser Spectroscopy, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

* Corresponding author, E-mail: zhaomin.tong@sxu.edu.cn

Abstract: To mitigate speckle arising from the high coherence of lasers in display applications, a static speckle-suppression approach is proposed based on a volume scattering diffuser (VSD) formed from a mixture of polystyrene (PS) microspheres and polydimethylsiloxane. PS microspheres with an average diameter of 600-700 nm were synthesized via soap-free emulsion polymerization, and VSDs with varying thicknesses were fabricated by spin coating. The scattering capability of the VSD was enhanced with increasing

收稿日期:2025-11-06;修订日期:2025-11-19.

基金项目:国家科技重大专项资助项目(No. 2025ZD0616600);长江学者和创新团队发展计划资助项目(No. IRT_17R70);高等学校学科创新引智计划(111计划)资助项目(No. D18001);山西省留学回国人员科技活动择优资助项目(No. 20210038)

thickness as the spin-coating speed decreased from 1 300 r/min to 600 r/min, and the scattering angle increased from 44° to 100° . In an optical test system, thicker VSDs more effectively reduced the temporal and spatial coherence of the laser, lowering the speckle contrast to 0.35. This work demonstrates an external-driver-free, noiseless, and high-efficiency static technique for laser speckle suppression in laser displays, with significant application potential.

Key words: laser display; laser speckle; volume scattering diffuser; static speckle suppression

1 引 言

激光显示作为新一代显示技术,具有宽色域、高亮度与长寿命等优点,已广泛应用于家庭影院、商业投影、数字影院、车载显示以及虚拟现实(Virtual Reality, VR)和增强现实(Augmented Reality, AR)等领域^[1]。然而,由于高时间和空间相干性,当激光照射到粗糙表面(如屏幕)时,散射光之间会发生随机干涉,从而产生激光散斑,降低显示图像的质量^[2]。

散斑是常见的光学现象^[3-5]。为了解决激光显示中的散斑问题和提高显示图像质量,研究人员提出了多种抑制散斑的方法,主要包括动态散斑抑制和静态散斑抑制。其中,动态散斑抑制方法的原理是在探测器或人眼的积分时间(曝光时间)内,通过利用移动散射光学元件^[6-7]、衍射光学元件^[8-9]、投影屏幕^[10-11]、旋转球镜扩散器^[12]或振动多模光纤^[13-14]等动态元件生成不相关的散斑图案并进行叠加,以达到抑制散斑的目的。静态散斑抑制方法则通常使用静态元件来破坏激光的相干性,以抑制散斑^[15],该方法在减小系统体积的同时增加了系统的稳定性。静态的方法可以分为4类:偏振多样性、波长多样性、角度多样性和空间多样性。其中,偏振多样性最多能将散斑对比度降低二分之一^[16];波长多样性与激光光源的光谱特征密切相关,虽可抑制散斑,但多样化光谱特征会降低显示色域^[17];角度多样性和空间多样性均通过抑制激光的空间相干性实现散斑抑制,常用器件包括多模光纤^[18]、光通管^[19]、漫散射体和复眼透镜阵列^[20]等。动态散斑抑制一般都存在外部驱动器件,会带来能耗增加、噪音大等问题。

散斑的产生本质上源于光的散射。当光入射到粗糙的表面或介质中的散射粒子时,就会发生光散射。散射现象可以分为两类:面散射和体散射^[21]。面散射片一般为蛋白石和磨砂玻璃板

等^[22]。体散射片(Volume Scattering Diffuser, VSD)的散射过程源于其材料内部介质的折射率非均匀性,因此,常用的制造方法就是将不同折射率的散射粒子与基体材料进行混合。VSD的散射能力与散射粒子的折射率、大小、体积(质量)分数以及厚度等有关。Ma等为了确定VSD与白光色温变化之间的关系,将环氧树脂与聚甲基丙烯酸甲酯颗粒的混合物倒入塑料模具并固化,制作了含有不同质量分数散射颗粒的VSD^[23]。Liu等以聚甲基丙烯酸甲酯为基体,聚对苯二甲酸乙酯为散射粒子^[24],通过熔融混合与压缩成型的方法制备VSD。上述制备方法均依赖模具,然而模具制造工艺复杂,且精度较低,无法满足对散射片厚度精确控制的要求。

本文采用无皂乳液聚合法制备出高纯度的聚苯乙烯(PS)微球,以聚二甲基硅氧烷(PDMS)为基体,PS微球为散射粒子,采用旋涂法在不同转速下制备了厚度变化的VSD。在光学测试系统中,使用多模激光二极管(LD)作为光源,使用CCD相机采集散斑图像,研究了VSD厚度对散斑对比度和光效的影响。

2 VSD 制备

2.1 PS微球合成

常见的PS微球的合成方法包括:乳液聚合、分散聚合、沉淀聚合、悬浮聚合和无皂乳液聚合等。其中,乳液聚合凭借高反应效率可应用于50~500 nm小粒径微球的规模化生产,但残留表面的活性剂脱除需依赖耗时耗能的纯化步骤(如超速离心或透析)。分散聚合可生成单分散性极佳的大颗粒(1~10 μm),但依赖稳定剂且其粒径上限受限于溶剂对聚合物的溶解度参数。沉淀聚合产物纯度高且分布窄(0.5~5 μm),但受限于低单体转化率及二次成核导致的粒径双峰分

布现象。悬浮聚合工艺简单、成本低,可制备毫米级颗粒,但受液滴碰撞聚并动力学影响,产物会呈现宽粒径分布及多孔表面形貌。

与传统制备方法相比,无皂乳液聚合法具有显著优势。该方法利用引发剂分解产生的带电基团实现静电稳定,规避了传统乳化剂对微球表面的化学污染问题。使用该方法制备的PS微球表面洁净、球形规整,有益于微球后续的改性或与其他化学物质的混合。

表1详细列出了进行无皂乳液聚合反应实验时所采用的各类试剂。其中,苯乙烯是参与反应的单体,过硫酸钾为聚合反应的引发剂,电解质氯化钠用于调节反应体系的离子强度,无水硫酸镁用于去除苯乙烯单体中的微量水分。除了苯乙烯之外,其余的化学试剂均未进行提纯,按照购买时的状态直接使用。

表 1 制备 PS 微球所用的实验试剂
Tab. 1 Experimental reagents for PS microspheres preparation

试剂名称	化学式	纯度	厂家
苯乙烯	C ₈ H ₈	AR	麦克林
过硫酸钾	K ₂ S ₂ O ₈	AR	国药集团
氯化钠	NaCl	AR	阿拉丁
无水硫酸镁	MgSO ₄	AR	国药集团
去离子水	H ₂ O	超纯	实验室自制
氢氧化钠	NaOH	AR	国药集团
氮气	N ₂	高纯	山西泰能

表2列举了聚合实验中所用的主要仪器,未列出的仪器包括氮气控制装置以及制备去离子

表 2 制备 PS 微球所用的实验仪器
Tab. 2 Experimental instruments for PS microspheres preparation

仪器名称	型号	生产厂家
电子天平	FA224C	宁波金诺
磁力搅拌仪	S10-3	上海司乐
恒温水浴锅	LC-WB-2	浙江力辰
数显搅拌器	LC-ES-60SH	浙江力辰
高速离心机	H3018DR	上海知信
超声波清洗机	SB-4200 DTD	宁波新芝
精密气体针型阀	ZXF-1	南京科立华
真空干燥箱	DZF-6020	合肥科晶

水所用的超纯水生成装置。

2. 1. 1 碱洗苯乙烯

为了消除市售苯乙烯中含有的阻聚剂对反应的不良影响,需要进行提纯处理。将一定量的苯乙烯倒入分液漏斗,再加入等量的质量分数为 10% 的氢氧化钠溶液。充分振荡后,混合液会自然分层,上层为油状苯乙烯,下层为浅红色的产物。弃去下层浅红色废液,收集并保留上层苯乙烯。将上述步骤重复 4 次,再使用等体积的去离子水对苯乙烯重复洗涤 4 次,以进一步清除残留的杂质。最后,用少量无水硫酸镁对其进行干燥,为防止纯化的苯乙烯自聚,将它置于温度为 2~8 ℃ 的恒温箱中储存。

2. 1. 2 反应装置搭建

聚合反应在四颈烧瓶内进行,烧瓶被固定在铁架台上,并连接恒压漏斗、球形冷凝管等部件确保装置整体稳固。玻璃器皿的磨口塞处均需涂抹真空硅脂来保证反应装置的气密性。干燥的氮气首先通过减压阀进行减压处理,随后通入四颈烧瓶中,流速由精密气体针型阀精确控制。图1为PS微球制备实验装置,包括反应容器、冷凝装置、加热装置、搅拌装置和通气装置。球形冷凝管用于冷凝回流易挥发的成分,提高原料利用率,减少损失。

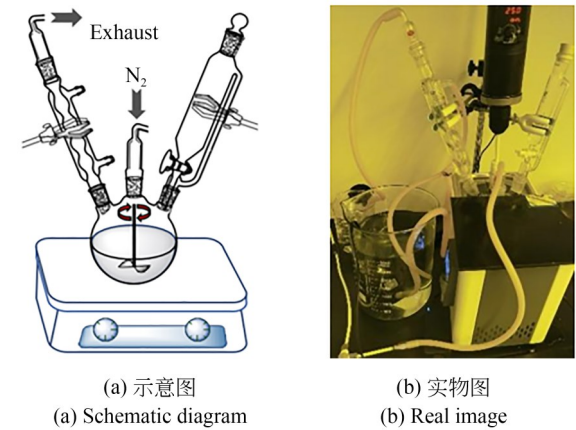


图 1 PS 微球制备反应装置
Fig.1 Reaction devices for preparation of PS microspheres

2. 1. 3 聚合反应

在室温条件下,先向四颈烧瓶中依次加入

100 g 去离子水、10 g 纯化后的单体苯乙烯和 0.3 g 氯化钠固体,并将 0.1 g 过硫酸钾固体溶解在 20 mL 去离子水中备用。再向烧瓶中通入氮气以驱除其中的氧气,同时启动搅拌器,并将搅拌器转速设定为 350 r/min,以确保单体充分分散。持续搅拌 15 min 后,将水浴锅的目标温度调整至 70 °C,并将搅拌器转速降至 250 r/min,以减少剪切力,避免微球团聚。待水浴锅温度达到预设值并稳定时,迅速加入过硫酸钾溶液以引发聚合反应,整个反应过程在氮气保护下持续进行 24 h。

2.1.4 回收与后处理

聚合反应结束后,将得到的乳液分装于离心管中进行离心处理,设置离心机转速为 9 000 r/min,温度为 20 °C,离心处理 10 min。倾倒离心产生的上层清液后,向离心管中加入无水乙醇进行超声分散处理,并再次离心以去除未反应的单体。随后,用去离子水将所剩固体离心洗涤两次,即可得到表面纯净的 PS 微球。最后,将微球重新分散在去离子水中,在室温下干燥 3 天,得到白色粉末。

实验结束后,使用日立 SU8010 场发射扫描电子显微镜 (Scanning Electron Microscope, SEM) 对样品形貌进行表征。采用上探头,设置工作距离为 8 mm,加速电压为 1 kV,电流为 5 μ A,聚焦至适当位置,SEM 图像如图 2 所示。图像显示,PS 微球的表面洁净,无杂质附着,且球形规整较均匀,微球的粒径主要分布在 600~700 nm。

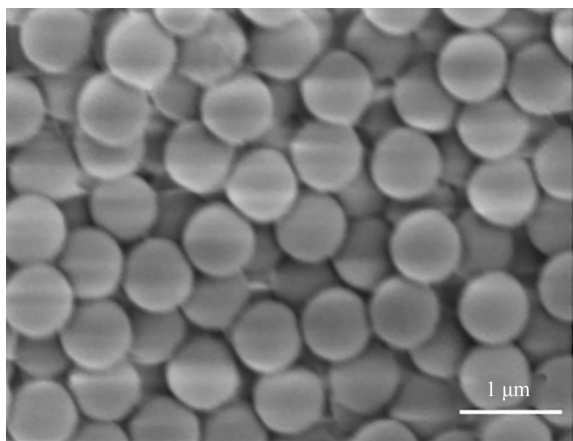


图 2 PS 微球的 SEM 图像

Fig. 2 SEM image of PS microspheres

2.2 不同厚度的 VSD 制备

VSD 是通过将 PS 微球和 PDMS 的混合物旋涂到玻璃基底上制备得到的。旋涂法是常用的均匀薄膜制备技术,通过改变旋涂时的转速,可实现对 VSD 厚度的精确控制^[25]。图 3 是 VSD 的制备流程,主要包括 PS 微球的分散、PS 微球与 PDMS 的混合、旋涂和软烘等步骤,详细步骤如下:

(1) 将玻璃片依次在丙酮、乙醇和去离子水中进行超声清洗,经氮气吹干后,放在 150 °C 的接触式热板上进行烘干。

(2) 称取适量 PS 微球,与少量酒精混合并超声分散 30 min。

(3) 将 PDMS 主剂与固化剂以 10:1 的质量比混合,再将微球与酒精的混合物倒入搅拌桶中,放置在磁力搅拌仪上搅拌 30 min,之后再放置到真空行星搅拌仪 (VM300SA2, SINOMIX) 中进一步搅拌混合,同时除去混合物中的气泡,用于接下来 VSD 的制备。

(4) 用两寸的玻璃片作为旋涂基底,将体积约为 2 mL 的混合物滴在玻璃基底上进行旋涂。旋涂仪设置为单步旋涂,旋涂时间为 60 s,旋涂速度分别设置为 600, 800, 1 000, 1 200, 1 300 r/min。由于过低或过高的 PS 微球和 PDMS 的质量比分别因散射中心少和 PS 微球易团聚而导致 VSD 散射性变差,不同厚度的 VSD 中 PS 微球和 PDMS 的质量分数分别为 9% 与 91%。

(5) 旋涂结束后,将涂覆了薄膜的玻璃基底放置在接触式热板上进行烘烤固化。为确保 PDMS 完全固化,将烘烤温度设置为 85 °C,烘

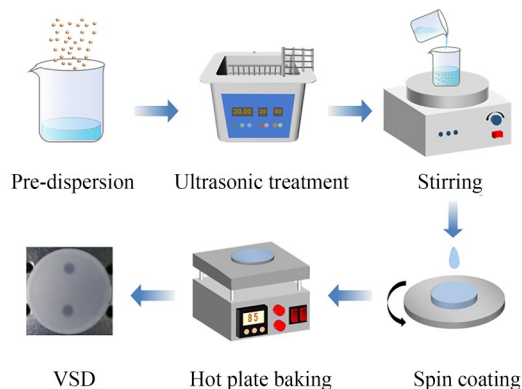


图 3 VSD 制备流程

Fig. 3 VSD preparation flow

烤2~3 h。

不同旋涂速度可制备得到不同厚度的VSD,并且旋涂速度越快制备的VSD厚度越薄^[26]。图4为旋涂速度为1 000 r/min时SEM所拍摄的VSD截面图,可观察到PS微球均匀地分散在PDMS中,该旋涂速度下VSD厚度为76 μm 。

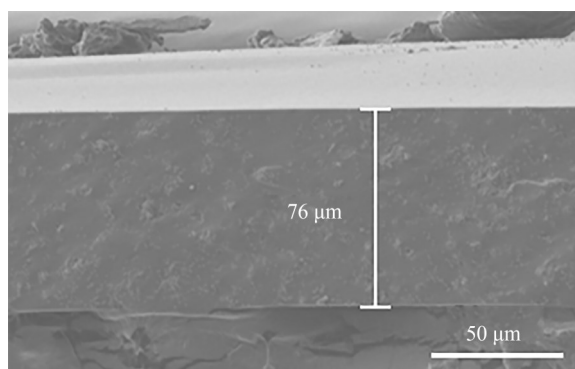


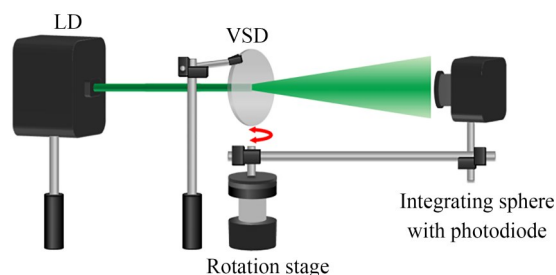
图4 VSD截面的SEM图

Fig. 4 SEM image of VSD cross section

2.3 散射角测量

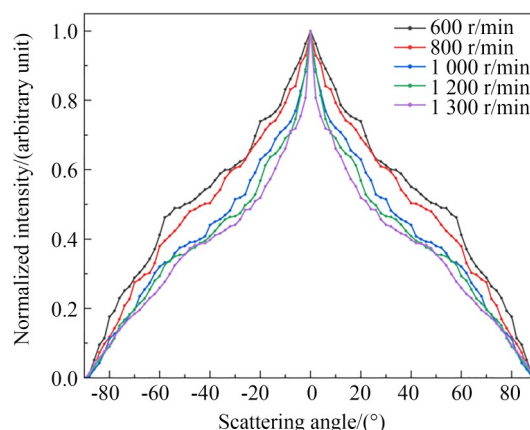
为了表征不同厚度的VSD散射光强度的角度分布,搭建了如图5(a)所示的散射角光学测试系统。实验光源采用多模LD(HL63163DG, THORLABS),其驱动电流设置为65 mA,并使用温控模块将其工作温度稳定在20 $^{\circ}\text{C}$ 。多模LD发出的激光束入射到VSD后发生散射,利用带有3 mm光阑孔径的积分球探测器(S142C, THORLABS)测量散射光强度。为了测量散射光强度的角度分布,使用300 mm长的接杆将积分球探测器固定在旋转台上,通过改变旋转台的角度使积分球探测器接收不同角度下散射光的光强。

不同旋转角度下测量得到的散射光强度随角度的分布情况如图5(b)所示,基于不同旋涂速度制备的VSD散射角(半高全宽值)分别为100 $^{\circ}$, 84 $^{\circ}$, 60 $^{\circ}$, 52 $^{\circ}$, 44 $^{\circ}$ 。随着旋涂速度的减小,VSD的厚度增大,散射角增大。这是因为在PDMS和散射粒子的质量分数相同的情况下,激光透射过较厚的VSD时会历经更多次的散射,散射角因此会更大,即越厚的VSD可以更有效地增强散射效果。



(a) 散射角光学测试系统

(a) Optical testing system for scattering angle



(b) 归一化散射光强度随散射角的变化曲线

(b) Curve of normalized scattering light intensity varying with scattering angle

图5 VSD散射光强度的角度分布测量

Fig. 5 Measurement of angular distribution of scattering light intensity of VSD

3 实验与讨论

3.1 实验装置

图6是由多模LD、VSD、光通管、毛玻璃以及CCD相机(PL-B776U, PIXELINK)组成的散斑图像采集系统示意图。多模LD发射出的激光束首先照射VSD,被VSD散射后的激光束被耦合入光通管,并在光通管内发生全内反射,使不均匀的散射光重新分布成光强分布均匀的照明光场。毛玻璃作为透射屏,其表面产生散斑光场,CCD相机用于采集散斑图像,其像素间距为3.2 μm 。其中,多模LD的中心波长为633 nm,驱动电流设置为65 mA,使用温控模块将其工作温度稳定在20 $^{\circ}\text{C}$,光通管长50 mm。为了避免采集的图像质量受到环境光的干扰,测量装置在暗室中搭建。

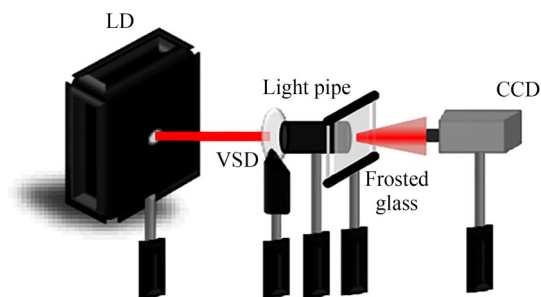


图 6 散斑测量实验装置

Fig. 6 Experimental setup for speckle measurement

3.2 结果与讨论

散斑对比度的计算公式为 $C = \sigma / \langle I \rangle$, 其中 σ 是光强的标准差, $\langle I \rangle$ 是光强的平均值。将图 6 中 VSD 替换为常规散射片的散斑图像, 如图 7(a) 所示, 其散斑对比度为 0.75。引入 VSD 和光通管后, CCD 相机拍摄的散斑图像如图 7(b)~7(f) 所示。测试结果发现, 引入 VSD 和光通管后可有效抑制激光散斑, 并且随着旋涂速度从 1 300 r/min 降低至 600 r/min, 即随着 VSD 厚度的增加, 散斑对比度从 0.50 逐渐降低至 0.35。

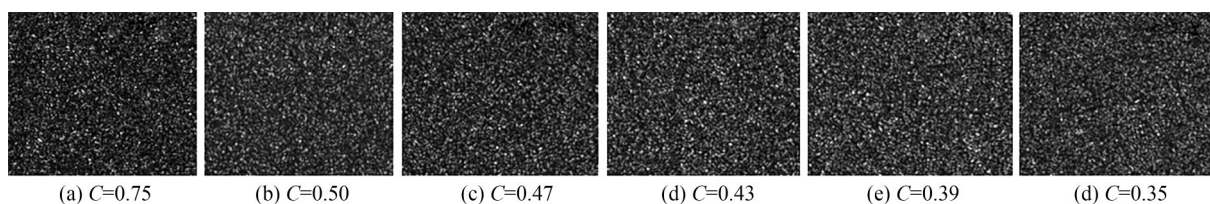


图 7 初始激光散斑和不同 VSD 厚度下的激光散斑

Fig. 7 Original laser speckle and laser speckles under different VSD thicknesses

本散斑抑制方案本质上是通过对 VSD 内 PS 微球的多次散射, 在散射光间引入光程延迟, 从而破坏激光的时间相干性以及空间相干性。较厚的 VSD 对激光的散射更强烈, 因此它对激光相干性的破坏更显著, 从而实现更好的散斑抑制效果。

4 结 论

本研究采用无皂乳液聚合法合成了单分散 PS 微球, 通过旋涂法制备了基于 PS 微球和 PD-MS 的静态 VSD, 通过改变旋涂速度来调控 VSD 的厚度, 系统研究了 VSD 厚度变化对激光散斑抑制性能的影响。实验结果表明, VSD 厚度的增

加导致散射次数的增加, 全宽半高散射角由 44° 增加至 100° , 散斑对比度由 0.50 降低至 0.35, 证实 VSD 厚度—VSD 散射角—散斑抑制效果存在正相关特性。

作者贡献声明:

吴其洲: 方法提出, 实验设计, 论文构思与撰写;

贾蓓: 实验设计, 数据整理和分析, 论文撰写;

陈亚琳: 数据整理, 论文撰写;

燕宇翔: 数据分析;

马维光: 论文指导, 研究管理与协调;

全召民: 论文指导、审核与编辑。

参考文献:

- [1] 黄艳, 陈怀熹. 激光投影显示中复合散斑抑制方法的研究[J]. 激光技术, 2024, 48(2): 274-280.
HUANG Y, CHEN H X. Analysis of composite speckle suppression technique in laser projection display [J]. *Laser Technology*, 2024, 48(2): 274-280. (in Chinese)
- [2] GOODMAN J W. Some fundamental properties of speckle[J]. *Journal of the Optical Society of Ameri-*

ca, 1976, 66(11): 1145.

- [3] 詹晓江, 甘楚立, 丁毅, 等. 基于经验模态分解的激光散斑噪声抑制方法[J]. 液晶与显示, 2023, 38(4): 495-506.
ZHAN X J, GAN CH L, DING Y, *et al.* Laser speckle noise suppression method based on empirical mode decomposition [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2023, 38(4): 495-506. (in Chinese)

- [4] 李骏睿, 曾湘文, 周露, 等. 多通道数字图像相关的柔性屏多层应变同步测量[J]. 光学精密工程, 2025, 33(15): 2354-2364.
LI J R, ZENG X W, ZHOU L, *et al.* Synchronous multilayer strain measurement of flexible displays based on multi-channel digital image correlation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2025, 33(15): 2354-2364. (in Chinese)
- [5] 赵琪涵, 罗凯祺, 蒲嘉祺, 等. 散斑条纹自适应寻线滤波[J]. 光学精密工程, 2025, 33(15): 2402-2413.
ZHAO Q H, LUO K Q, PU J Q, *et al.* Speckle fringes adaptive path-seeking filtering method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2025, 33(15): 2402-2413. (in Chinese)
- [6] PAN J W, SHIH C H. Speckle noise reduction in the laser mini-projector by vibrating diffuser [J]. *Journal of Optics*, 2017, 19(4): 045606.
- [7] 付瀚毅, 刘伟奇, 魏忠伦, 等. 转动随机微透镜阵列对激光显示中散斑的抑制[J]. 液晶与显示, 2015, 30(2): 359-364.
FU H Y, LIU W Q, WEI ZH L, *et al.* Speckle reduction using rotating random micro-lens array in laser display [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(2): 359-364. (in Chinese)
- [8] LE Z CH, LIU Z SH, QIU Y J, *et al.* Fabrication of ultrathin flexible diffractive optical elements (DOEs) and application for laser speckle suppression [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 159: 107223.
- [9] 段祥瑞, 费澳鑫, 卢智易, 等. 履带式运动柔性衍射光学器件抑制激光散斑及其耐久性实验[J]. 光学精密工程, 2023, 31(4): 459-469.
DUAN X R, FEI A X, LU ZH Y, *et al.* Tracked motion flexible diffractive optical elements suppressing laser speckle and its durability test[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(4): 459-469. (in Chinese)
- [10] TU S Y, LIN H Y, LIN M C. Efficient speckle reduction for a laser illuminating on a micro-vibrated paper screen [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(22): E38-E46.
- [11] YUAN Y, WANG D D, SUN M Y, *et al.* Influence and evaluation of vibrating screen methods on subjective speckle reduction[C]. *Fifth Symposium on Novel Optoelectronic Detection Technology and Application*. October 24-26, 2018. Xi'an, China. SPIE, 2019: 131.
- [12] KUMAR V, KUMAR DUBEY A, GUPTA M, *et al.* Speckle free efficient light engine for high power laser projectors and automobile headlamps [J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 152: 108145.
- [13] ZHOU X, SUN J F, FAN ZH G, *et al.* Detection performance improvement method of single-photon LiDAR by the combination of speckle suppression with adaptive adjustment of aperture diameter and spatial correlation method[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2023, 160: 107282.
- [14] ZHOU X, SUN J F, JIANG P, *et al.* Theoretical and experimental investigations on speckle suppression of dual-wavelength imaging LiDAR by vibrating the multimode fiber[J]. *Measurement*, 2022, 188: 110588.
- [15] TONG ZH M, YAN Y X, MA Y F, *et al.* Equal-intensity beam splitter fabricated by segmented half-wave plate for passive laser speckle reduction[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(16): 3965-3968.
- [16] TRAN T T K, SVENSEN Ø, CHEN X Y, *et al.* Speckle reduction in laser projection displays through angle and wavelength diversity [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(6): 1267-1274.
- [17] 权志豪. 半导体激光显示中散斑问题的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
QUAN ZH H. *Study of Scattering Problem In Semiconductor Laser Display*[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022. (in Chinese)
- [18] SCHRÖDER D, DESCHAMPS J, DASGUPTA A, *et al.* Cost-efficient open source laser engine for microscopy[J]. *Biomedical Optics Express*, 2020, 11(2): 609.
- [19] ROELANDT S, TERVO J, MEURET Y, *et al.* Propagation of partially coherent light through a light pipe [J]. *Optics Express*, 2013, 21(14): 17007-17019.
- [20] MA X H, WANG A T, MA F H, *et al.* Speckle reduction using phase plate array and lens array[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2020, 3(1): 19003601-19003606.
- [21] GOODMAN J W. *Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications*[M]. Philadelphia: Roberts & Co. 2007.
- [22] DASHTDAR M, TAVASSOLY M T. Transforming a spatially coherent light beam into a dif-

- fused beam of small diffusion angle using suitable surface scattering [J]. *Optics Communications*, 2013, 308: 7-10.
- [23] MA S H, CHEN L S, HUANG W C. Effects of volume scattering diffusers on the color variation of white light LEDs[J]. *Journal of Display Technology*, 2015, 11(1): 13-21.
- [24] LIU X, XIONG Y, SHEN J B, *et al.* Fast fabrication of a novel transparent PMMA light scattering materials with high haze by doping with ordinary polymer[J]. *Optics Express*, 2015, 23(14): 17793-17804.
- [25] MENDHE A C. *Spin Coating: Easy Technique for Thin Films*[M]. Simple Chemical Methods for Thin Film Deposition. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023: 387-424.
- [26] SAHU N, PARIJA B, PANIGRAHI S. Fundamental understanding and modeling of spin coating process: a review [J]. *Indian Journal of Physics*, 2009, 83(4): 493-502.

作者简介:



吴其洲(1978—),男,江苏宿迁人,博士,副教授,2017年于中北大学获得博士学位,主要从事材料缺陷检测与重构、基于OCT的眼底病识别等方面的研究。E-mail: wu_qz@nuc.edu.cn

通讯作者:



全召民(1982—),男,河南南阳人,博士,教授,2013年于挪威科技大学获得博士学位,主要从事激光显示、光电传感等方面的研究。E-mail: zhaomin.tong@sxu.edu.cn