

激光投影显示中新型散射体的散斑抑制

孟祥翔^{1,2}, 刘伟奇¹, 魏忠伦¹, 康玉思¹, 张大亮¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033 ;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 激光的强相干性造成了激光投影显示中出现大量干涉条纹和散斑, 为了消除干涉条纹和散斑对图像质量的影响, 采用旋转新型散射体(Engineered Diffuser™)的方法在一定积分时间内获得叠加的清晰图像。首先, 介绍了激光投影显示中散斑的成因及采用时间平均抑制散斑的理论依据。接着, 分析了传统散射体毛玻璃和 Engineered Diffuser™ 在结构及功能上的区别。最后, 建立了旋转新型散射体抑制散斑的激光投影显示实验装置, 对比验证了旋转新型散射体抑制散斑的效果。实验结果表明: 散斑对比度降低到 3.08%, 图像质量良好, 无明显干涉条纹。该方法满足商用激光投影显示体积小、简单易行等要求。

关键词: 激光显示; 散斑; 新型散射体; 散射

中图分类号: TN873 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)02-0503-05

Speckle suppression by new diffuser in laser projection display system

Meng Xiangxiang^{1,2}, Liu Weiqi¹, Wei Zhonglun¹, Kang Yusi¹, Zhang Daliang¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: There are many interference fringes and speckle on the screen of laser projection display system during to the strong coherent characteristic of laser. In order to eliminate the influence of interference fringes and speckle on image quality, temporally averaged patterns was obtained by rotating a new kind of diffuser called Engineered Diffuser™. First, the reason of speckle formation and the theory of speckle suppression through temporally averaged patterns were introduced. Then the differences on structure and function between traditional diffuser ground glass and Engineered Diffuser™ were analyzed. Finally, the speckle suppression experiment by rotating Engineered Diffuser in laser projection display system was established. The effect of speckle suppression was tested by comparing other speckle suppression methods. Experimental results indicate that the speckle contrast is weakened to 3.08%. The patterns quality is good and has no interference fringes. It can satisfy the laser projection display system requirements of small volume, simple practice and so on.

Key words: laser display; speckle; new diffuser; scatter

收稿日期: 2014-01-15; 修订日期: 2014-03-26

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划(2009AA032701)

作者简介: 孟祥翔(1988-), 男, 博士生, 主要从事激光显示、光学设计及激光整形等方面的研究。Email: mengxx326@126.com

导师简介: 刘伟奇(1958-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光显示、空间目标成像方面的研究。Email: liuwq@ciomp.ac.cn

0 引言

激光的高亮度和良好的光束质量使其成为投影显示中更有优势的光源^[1-4],但激光的强相干性产生的大干涉条纹和散斑严重阻碍着激光投影显示的实际应用。自激光产生以来,很多应用都受到激光散斑的影响^[5-7],国内外的科研工作者提出了很多减弱散斑影响的方法,比如旋转毛玻璃^[4]、振动屏幕^[8]、衍射元件^[9-10]、超声光栅^[11]、振动光纤^[12]等。其中旋转毛玻璃因其良好的散斑抑制效果已在干涉仪中得到了广泛的应用。但是毛玻璃较强的散射特性,造成了很大一部分光能无法利用,因此,旋转毛玻璃方法虽然散斑抑制效果好,却一直没有在激光投影显示领域中得到实际应用。

随着激光直写技术的发展,产生了一种新型散射体—Engineered DiffusersTM^[12-13], Engineered DiffusersTM最早应用时是作为背投显示屏幕,由于它可以同时控制出射光束的发散角和光强分布,相比普通背投屏幕具有更高的光能利用率,该背投屏幕图像对比度更高。目前 Engineered DiffusersTM 广泛应用于光束整形领域。

相比具有相同特征尺寸的毛玻璃,Engineered DiffuserTM 具有更高的能量利用率和光强控制能力。文中提出了在激光投影显示系统中加入旋转新型散射体 Engineered DiffusersTM 的方法进行散斑抑制,并通过实验进行了验证。

1 散斑抑制原理

散斑的成因如图 1 所示,当相干光经波长尺度上是粗糙的物体反射(或透射)时,不同的反射(或透射)光之间会产生随机的光程差,这些光线相互干涉形成了随机的干涉图样,即为观察到的散斑。

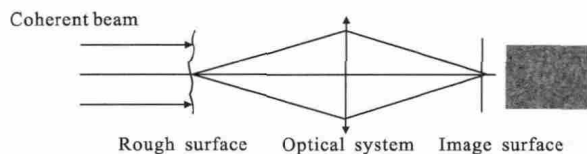


图 1 散斑成因

Fig.1 Speckle formation

在激光投影显示中评价散斑最重要的指标是散斑对比度,散斑对比度定义为散斑图样的强度标准

差与强度平均值之比。对于 N 个独立散斑图样在强度上叠加,总强度的对比度 C 可表示为^[14]:

$$C = \frac{\sigma_s}{I_s} = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^N \bar{I}_n^2}}{\sum_{n=1}^N \bar{I}_n} \quad (1)$$

式中: σ_s 为总强度的标准差; \bar{I}_s 为总强度的平均值; \bar{I}_n 为第 n 幅散斑图样的平均强度。当各独立分量平均强度都相等时,散斑对比度公式可简化为:

$$C = \frac{1}{\sqrt{N}} \quad (2)$$

由于旋转散射体在一定积分时间内相继产生的散斑图样之间往往是相关的,此时该积分时间内的散斑对比度在 $1 \sim 1/\sqrt{N}$ 之间,而且在该积分时间内的散斑图样数目越多,散斑对比度越接近于理论值 $1/\sqrt{N}$ 。在一定积分时间内的散斑图样自由度数目为^[14]:

$$N = \frac{\left(\int_{-\infty}^{+\infty} P_T(\tau) d\tau \right)^2}{\int_{-\infty}^{+\infty} K_T(\tau) |\mu_A(\tau)|^2 d\tau} \quad (3)$$

式中: $P_T(\tau)$ 为积分窗口的权重函数; $K_T(\tau)$ 为 $P_T(\tau)$ 的自相关函数; $|\mu_A(\tau)|^2$ 为时间上强度的自协方差函数。在 $0 \leq t \leq T$ 内的均匀积分窗口,散斑对比度可表示为:

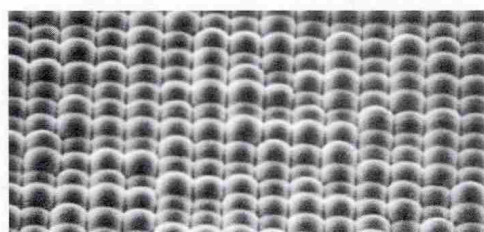
$$C = \frac{1}{\sqrt{N}} = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^T \left(1 - \frac{\tau}{T} \right) |\mu_A(\tau)|^2 d\tau} \quad (4)$$

由上式可以得出,散斑对比度与积分时间和强度的自协方差函数有关。在激光投影显示中,积分时间对应于人眼的视觉暂留时间。在相干光源相同的情况下,强度的自协方差函数由散射体的粗糙程度决定。

毛玻璃是由一定尺寸大小的玻璃砂在光滑玻璃表面研磨而成的,玻璃砂的尺寸大小决定着其粗糙程度和出射光束的发散角。由此可看出,毛玻璃散射单元中心的位置和固定位置处散射单元的形状是无法直接控制的,毛玻璃体现出来的散射性质是一种统计平均性质。

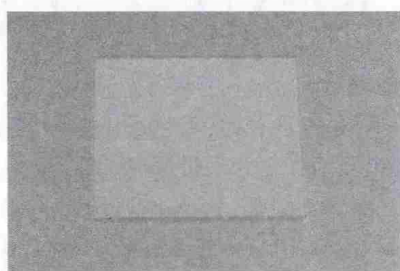
相较于毛玻璃和衍射元件,Engineered DiffusersTM^[12] 的散射单元为小微透镜,孔径直径在几十微米左右,小微透镜的矢高决定出射光束的发散角,无疑具有更高的光能透过率及所需角度范围内的光能利用率,图 2(a)为一款 Engineered DiffusersTM 的表面微结

构^[13]。Engineered Diffusers™ 采用单点激光直写技术加工,矢高最高加工深度可达 100 μm ,还可以通过改变小微透镜的孔径大小来弥补矢高深度加工误差带来的精度损失。图 2(b)为实验室在美国 RPC Photonics 公司定制的一款全材质为融石英的 Engineered Diffuser™,实际测得其透过率曲线如图 2(c)所示,在 405~850 nm 波段范围内,该片 Engineered Diffuser 的



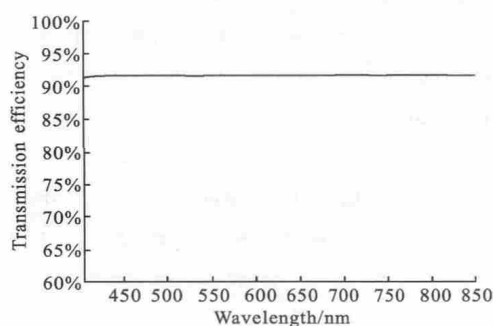
(a) 表面结构

(a) Surface microstructure



(b) 融石英材质 Engineered Diffuser™

(b) Engineered Diffuser™ made by fused Silica



(c) 透过率曲线

(c) Transmission efficiency curve

图 2 Engineered Diffuser™

Fig.2 Engineered Diffuser™

透过率在 91.6%左右。将功率为 0.32 W 的二极管泵浦激光准直入射到该 Engineered Diffuser™ 微结构面,图 3 为在 1.5 m 处的屏幕上得到的光斑,图 4 为光强轮廓归一化曲线。可以看出,每一个微透镜发出的光在被照面上叠加,最后形成了平顶分布,绝大部

分的透射光能集中在直径为 320 mm 的圆内,相比毛玻璃出射的高斯分布,平顶分布更有利于提高激光投影显示系统的光能利用率。

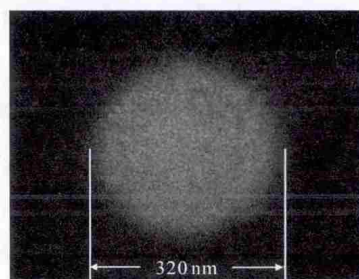


图 3 1.5 m 处光斑

Fig.3 Light spot at 1.5 m

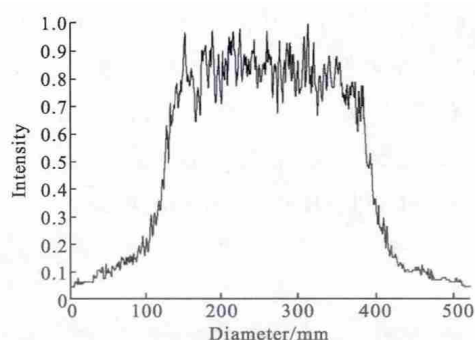


图 4 光强曲线

Fig.4 Intensity distribution profile

2 实验与结果

图 5 为简化的激光投影显示实验示意图,实验采用 DMD 作为空间光调制器。激光准直入射到电机带动旋转的 Engineered Diffuser™ 上,光束经过 Engineered Diffuser™ 发散被照明系统均匀入射到 DMD 上,DMD 相当于图像发生器,然后再经过投影镜头将 DMD 成像在屏幕上,利用 CCD 相机对屏幕进行拍照。

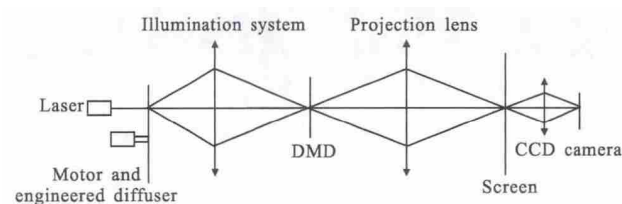


图 5 激光投影显示实验示意图

Fig.5 Scheme of laser projection display experiment

实验中,采用功率为 0.32 W 的二极管泵浦激光器,波长为 532 nm;电机的额定电压为 24 V,额定电

压下空载 5 400 转/min,由直流电源调节电机的输入电压进而控制其转速;散射体采用图 2(b)所示定制的全材质为融石英的 Engineered Diffuser™;空间光调制器 DMD 的分辨率为 1 024×768;CCD 相机曝光时间设为 30 ms。

图 6(a)为图 4 光路中不加入 Engineered Diffuser™时所拍摄的屏幕图像,此时屏幕上不仅有大量的散斑,还存在更为明显的大干涉条纹,严重破坏了图像质量。在图 5 所示光路中加入 Engineered Diffuser™,但不旋转,屏幕图像如图 6(b)所示,此时由于加入了 Engineered Diffuser™,散射单元出射发散光束的叠加,在一定程度上消弱了散斑对比度,大干涉条纹基本不存在,但是仍有杂乱的散斑。图 6(c)为旋转混光棒消散斑的效果图,旋转混光棒明显降低了散斑对比度,但仍存在两条明显的干涉条纹。图 6(d)为如图 5 所示的光路,旋转 Engineered Diffuser™时的屏幕图像,在 MATLAB 中转化为灰度图形,并利用公式(1)计算散斑对比度为 3.08%,完全满足激光投影显示的要求。

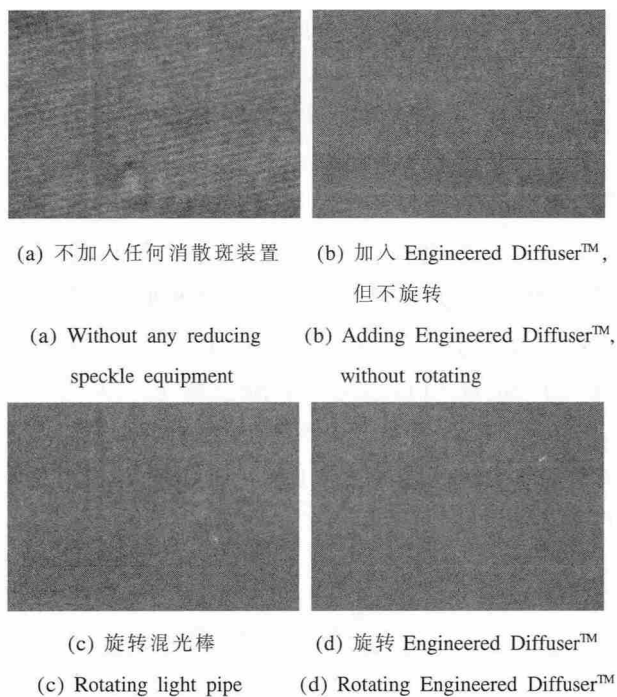


图 6 实验结果

Fig.6 Experiment result

3 结 论

文中提出了旋转新型散射体 Engineered Diffuser™的方法对激光投影显示中出现的散斑和干涉条纹进

行抑制。分析了散斑的成因、抑制原理和该散射体的结构特点,利用 Engineered Diffuser™高透过率的特点,弥补了传统散射体在能量利用率上的不足,并建立了激光投影显示系统进行散斑抑制实验。实验结果表明:散斑对比度降低到 3.08%,并且消除了大干涉条纹的影响。该散斑抑制方法占用空间小,能量利用率高,满足批量化生产要求。

参考文献:

- [1] Chellappan K V, Erden E, Urey H. Laser-based displays: a review [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(25): 2593–2601.
- [2] Liu Weiqi, Wei Zhonglun, Kang Yusi, et al. Color video display technique based on diode pump laser [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2004, 19(5): 325–328. (in Chinese)
刘伟奇, 魏忠伦, 康玉思, 等. 全固态激光彩色视频显示技术[J]. *液晶与显示*, 2004, 19(5): 325–328.
- [3] Kartashov V, Akram M N. Speckle suppression in projection displays by using a motionless changing diffuser[J]. *J Opt Soc Am A*, 2010, 27(12): 2593–2601.
- [4] Kuratomi Y, Sekiya K, Satoh H, et al. Speckle reduction mechanism in laser rear projection displays using a small moving diffuser [J]. *J Opt Soc Am A*, 2010, 27(8): 1812–1817.
- [5] Dufour S, Atchia Y, Gad R. et al. Evaluation of laser speckle contrast imaging as an intrinsic method to monitor blood brain barrier integrity [J]. *Biomedical Optics Express*, 2013, 4(10): 1856–1875.
- [6] Noordman O, Tychkov A, Baselmans J, et al. Speckle in optical lithography and its influence on linewidth roughness [J]. *J Micro/Nanolith MEMS MOEMS*, 2009, 8(4): 043002.
- [7] Goodman J W. Some properties of speckle from smooth objects[J]. *Optical Engineering*, 2010, 49(6): 068001.
- [8] Shin Sung Chul, Yoo Sin Sung, Lee Sang Yeon, et al. Removal of hot spot speckle on rear projection screen using the rotating screen system [J]. *Journal of Display Technology*, 2006, 2(1): 396–401.
- [9] Ouyang Guangmin, Tong Zhaomin, Akram M N, et al. Speckle reduction using a motionless diffractive optical element [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(17): 2852–2854.
- [10] An Seungdo, Lapchuk Anatoliy, Yurlov Victor, et al. Speckle suppression in laser display using several partially coherent beams [J]. *Optics Express*, 2008, 17(1): 92–103.

- [11] Li Xia, Hao Li, Liu Weiqi, et al. Speckle reduction in laser display [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2007, 22(3): 320–324. (in Chinese)
李霞, 郝丽, 刘伟奇, 等. 激光显示中散斑减弱的研究[J]. 液晶与显示, 2007, 22(3): 320–324.
- [12] He Fengtao, Jia Qiongyao, Sun Linjun. Design of liquid crystal laser projection display system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(10): 2699–2702. (in Chinese)
贺锋涛, 贾琼瑶, 孙林军. 液晶激光投影显示系统设计[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(10): 2699–2702.
- [13] Tasso R M. Structured microlens arrays for beam shaping [C] //SPIE, 2003, 5175: 109–120.
- [14] Tasso R M, Stephen C, Donald J S, et al. LED illumination control and color mixing with engineered diffusersTM [C]// SPIE, 2004, 5530: 133–2140.
- [15] Goodman J W. Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications [M]. Greewood Village: Roberts and Company Publisher, 2006.