

文章编号 1004-924X(2019)02-0271-08

用于激光背光源电视的扫描分光与消散斑系统

宋少华^{1,2}, 仝召民^{1,2*}

(1. 山西大学 激光光谱研究所 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西 太原 030006;
2. 极端光学协同创新中心, 山西 太原 030006)

摘要:针对单颗激光二极管光功率过高不能直接用于激光液晶电视光源阵列的限制, 本文设计了将高功率激光束分为多束功率接近的子光束的扫描分光系统, 从而为液晶电视提供激光背光。系统中激光器发出的准直光束经过扫描振镜进行二维扫描后, 经凸透镜和柱面透镜会聚成一条细线型光束耦合进一维多模光纤阵列, 从而达到分光的目的。此外, 基于扫描振镜和多模光纤实现了系统散斑的抑制。实验结果显示, 11 根光纤的平均单根出射功率为 674.13 μW , 离散系数为 16%, 平均散斑对比度为 0.162。使用激光作为背光源的激光液晶电视因其优秀的显示性能而具备强大的市场竞争力和广阔的市场前景。

关键词:液晶电视; 激光电视; 扫描振镜; 背光; 分光; 散斑抑制

中图分类号: O439; TN949.15 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20192702.0271

Scanning beam splitting and speckle reduction system for laser backlight TV

SONG Shao-hua^{1,2}, TONG Zhao-min^{1,2*}

(1. *State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices,
Institute of Laser Spectroscopy, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;*
2. *Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China*)
** Corresponding author, E-mail: zhaomin.tong@sxu.edu.cn*

Abstract: Lasers demonstrate characteristics of high brightness and good monochromaticity. Moreover, the cost of liquid crystal display (LCD) planes are low as they have been developed extensively. Because of their excellent display performance, laser LCD televisions (TVs), which use lasers as their backlight, demonstrate strong market competitiveness and extensive market potential. The use of a light source array is a common technique for backlight system design. To limit the high power supplied by a single laser diode to an array, this study designed a scanning beam splitting system that divided the high-power laser beam into multiple sub-beams with sufficient power to provide a laser backlight for LCD TVs. The collimated laser beam in this system was initially scanned in two dimensions by a galvanometer scanner and then made to converge into a narrow linear beam by a convex lens and a cylinder lens; finally, it was coupled into an optical multimode fiber array. Thus,

收稿日期: 2018-09-21; **修订日期:** 2018-11-20.

基金项目: 国家重点研发计划重点专项 (No. 2016YFB0401903); 山西省重点研发计划重点专项 (一般) 国际合作项目 (No. 201703D421015)

beam splitting was achieved. In addition, based on the scanning mirror and multimode fibers, the system also exhibited a speckle reduction effect. The experimental results demonstrated that the coefficient of variation in the average output power of 11 fibers is 16%, with an average value of 674.13 μW , and their average speckle contrast is 0.162.

Key words: LC-TV; laser TV; galvanometer scanner; backlight; beam splitting; speckle suppression

1 引言

平板显示器(Flat Plane Displays, FPD)以其体积小、功耗低、无辐射的优点成为 21 世纪电视机的主流显示器件。平板显示技术中,液晶显示(Liquid Crystal Displays, LCD)已大规模商业化,而有机发光二极管(Organic Light Emitting Diode, OLED)显示处于研发和初步试用阶段。液晶显示器是一种采用液晶材料的平板显示设备,液晶本身不发光,必须由背光模组提供背光源。在电场作用下,液晶分子产生排列上的变化,结合液晶面板中的偏光板和滤光片,实现对透射光亮度和颜色的调节^[1]。OLED 可以主动发光,不需要背光模组,相对 LCD 而言可以达到更高的显示对比度和更薄的器件厚度。但 OLED 的缺点是技术不成熟、成本高、寿命短^[2],因此技术成熟且成本较低的 LCD 在未来一段时间内仍然是市场的主导。LCD 本身不发光,液晶电视的色域覆盖率由背光种类决定,光源的单色性越好,色域覆盖率越大。目前,液晶电视中色域覆盖率最大的量子点电视可以达到 110% NTSC^[3]。而激光的单色性比量子点更好,RGB 三基色激光显示色域能达到 160% NTSC^[4]。因此,激光液晶电视具有强大的市场竞争力和开阔的市场前景。

在实际应用中,激光光斑面积远小于背光板面积,单激光束只能为液晶面板的一小部分区域提供照明,因此需要通过一些手段将激光转换为线光源或面光源。日本的 Ichiro Fujieda 等人利用侧发光光纤将激光转为线光源^[5],他们还利用弯曲的塑料光纤将激光转为面光源^[6]。北京工业大学王志平等人设计了一种反光杯实现了面光源的转换^[7]。本文参考 LED 阵列产生背光的方式^[8],使用激光阵列将点光源转换为线光源或面光源。由于激光二极管(Laser Diode, LD)功率过高,采用 LD 阵列,电视亮度将超出使用需求。因

此,本文设计了一种扫描分光系统,将高功率激光束分为多束能量接近的子光束。此外,激光显示技术中需要对散斑进行抑制。散斑是相干光束在粗糙表面透射或反射时,因干涉效果而形成的亮度随机分布的现象^[9],它的存在会降低图像清晰度。该分光系统具备一定的散斑抑制能力,配合光源系统中其他的散斑抑制机制,有望将散斑对比度降低至 4% 以下。

2 工作原理

2.1 扫描分光原理

单颗 LED 发光面积小,将 LED 组成合适的阵列能提供背光板需要的线光源或面光源^[10]。根据 LED 的入射方式可分为直下式和侧入式,图 1 是直下式 LED 液晶显示器的结构图,LED 阵列组成面光源从下方照射背光板。而侧入式结构中,LED 阵列从背光板的侧面进行照明。参考此类结构,本文使用激光束阵列为液晶电视提供激光背光。

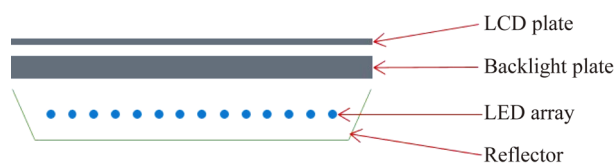


图 1 直下式 LED 液晶显示器结构图

Fig. 1 Structure of direct illumination-type LED of LCD

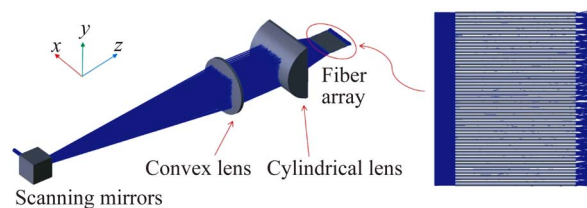


图 2 激光液晶电视的背光源分光系统

Fig. 2 Beam splitting system for backlight of laser LCD-TV

图 2 是本文设计的激光液晶电视的背光源扫描分光与消散斑系统。激光模组发出的准直光束入射到扫描振镜组,扫描振镜组由两面反射镜组成,反射镜连接在各自的摆动电机上实现对入射光束的二维扫描,图 3 是其实物图。电机的摆动幅度和频率由函数发生器控制,可以在一定范围内连续调节,但振幅或频率过大时,电机的摆动将变得不稳定。需要指出的是,该扫描振镜不仅将入射光束的传播方向改变了 90° ,还将光束在垂直于传播方向的平面内旋转了 90° 。

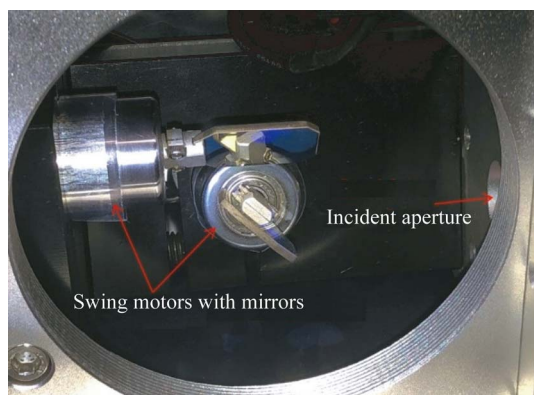


图 3 扫描振镜组实物图

Fig. 3 Picture of galvanometer scanners

系统中反射镜位于凸透镜的焦平面上,根据几何光学,从凸透镜焦平面上与原点距离为 h 的一点发出的光束,经过焦距为 f_1 的凸透镜后成平行光出射,平行光与 Z 轴的夹角为:

$$\theta = \arctan\left(\frac{h}{f_1}\right). \quad (1)$$

激光显示技术中一般通过 LD 合束的方法来获得高功率的激光输出,这样的光束面积一般较大^[11],不能看作点光源,扫描光束通过凸透镜后成为发散角非常小的准平行面光束入射到柱面透镜。图 2 中柱面透镜只在 Y 方向有光束会聚作用,入射光束在它的后焦平面会聚成一条水平细线型光束并与多模光纤阵列进行耦合,最终在光纤阵列输出端达到分光的目的。凸透镜的前焦平面和柱面透镜的后焦平面构成系统的一对共轭面,因此本文将它们定义为系统的物面和像面。

光线可以在多模光纤内无反射损耗传播的条件是:(1)光线入射在纤芯区域内;(2)光线入射角要小于光纤接收角。为了提高耦合效率,首先应

保证上述细光束的高度小于纤芯直径,这就要求系统的共轭放大率的绝对值要足够小。其次,光线的最大入射角正相关于扫描半角,这里通过 Zemax 光学仿真软件分析,确保它不大于光纤接收角。图 2 中系统 Y 方向的垂轴放大率为:

$$\beta = -\frac{f_2}{f_1}, \quad (2)$$

其中: f_2 为柱面透镜的焦距, f_1 为凸透镜焦距,负号表示物像方向相反。设 y 为经扫描后光束在物面上的高度, y' 为细光束在像面上的高度,则有:

$$y' = |\beta \times y|. \quad (3)$$

式(3)未考虑系统像差对 y' 的影响,实际数值受系统像差的影响会增大。

2.2 散斑抑制原理

散斑是相干光束在粗糙表面透射或反射时,透射光或反射光因干涉效果而形成亮度随机分布的现象。激光显示中的散斑效应大幅降低了图像的清晰度,必须对它进行抑制。通常用散斑对比度 C 来表征散斑的强弱程度:

$$C = \frac{\sigma_I}{\langle I \rangle} = \frac{\sqrt{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}}{\langle I \rangle}, \quad (4)$$

其中:符号 $\langle \rangle$ 表示变量的统计平均值, I 是光场的亮度分布函数, σ_I 是光场的亮度标准差。 C 的数值越大,散斑越严重。激光显示技术要求将散斑对比度降低到 4% 以下^[12]。

激光入射到多模光纤端面时,满足耦合条件的光线将根据入射的角度和位置,激励某些特定的导模^[13]。不同导模的传播路径不同,光程也不同,于是在光纤的输出端产生相位差异,这种现象也被称为光纤的模间色散。光纤末端全部导模的干涉效应形成光纤散斑^[14-15]。如果改变光束入射角,各导模的能量会随之变化,其中第 k 个导模的能量变化为:

$$\Delta P_k = \sum_{l=1}^m h_{k,l} (P_k - P_l), \quad (5)$$

其中: P_k 和 P_l 分别是第 k 个和第 l 个导模的能量, $h_{k,l}$ 是二者的能量耦合系数, m 是总的导模个数。当施加外部扰动例如改变光线入射角时,耦合系数 $h_{k,l}$ 随机变化,因此 m 个导模之间的随机相位起伏均匀而独立地分布在 $[0, 2\pi]$ 上。假设各个导模的光功率相等,且 m 足够大,则多模光

纤出口的散斑对比度为:

$$C_t = \frac{1}{m\Delta\tau} \sqrt{\int_0^{m\Delta\tau} 2(m\Delta\tau - \tau) |\gamma(\tau)| d\tau}, \quad (6)$$

其中: τ , $\Delta\tau$ 和 γ 分别代表导模的延迟时间, 第 k 个和第 $k-1$ 个导模的延迟时间差以及激光源的复时间相干度。根据公式(6), 光纤出口散斑对比度 C_t 反比于导模数量 m , 因此光束与光纤的入射角度变化范围越大, m 越大, 散斑对比度越低。图 2 所示的系统中, 振镜对光束进行水平扫描时, 反射光束每改变一个小的角度, 像面上的光斑就会从前一根光纤移动到下一根光纤, 因此 m 不会增大, 散斑不能得到抑制。相反, 光束在竖直方向进行扫描时, 柱面透镜能将全部角度的扫描光束会聚到光纤端面上, 从而显著增大 m 值, 降低散斑对比度。

综上, 系统水平方向的扫描能实现分光的目的, 竖直方向的扫描能实现散斑抑制的目的。

3 实验与结果讨论

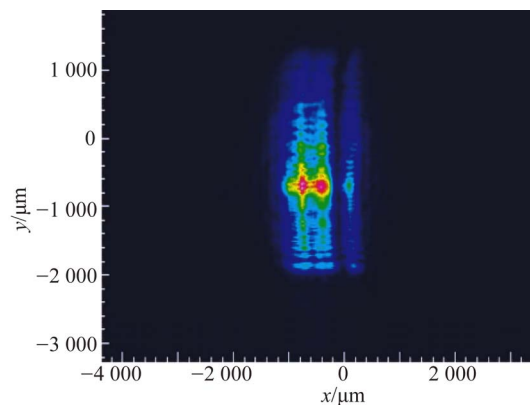
实验采用中心波长为 450 nm 的蓝色半导体多模激光器, 鉴于多模光束和扫描光束的能量分布轮廓复杂, 如图 4 所示, 这里使用光斑的 $4\sigma_y$ 表征光束的高度。 σ_y 的定义如下:

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum [(y - y_c)^2 \times p(x, y)]}{I_s}}, \quad (7)$$

其中: x 和 y 是水平和竖直坐标, y_c 是光束质心的竖直坐标, p 是光强分布函数, I_s 是总的光强值。对于标准高斯光束, $4\sigma_y$ 边界处的光强降为中央峰值的 $\frac{1}{e^2}$ 。

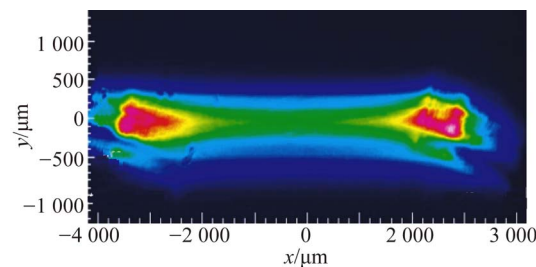
使用光束质量分析仪测得激光器发出光束在物面上的宽度为 1 296 μm 。光束被扫描镜反射后在垂直于传播方向的平面内旋转了 90° , 因此在物面上的高度 $y = 1 296 \mu\text{m}$ 。凸透镜使用 Thorlabs 公司的 LB1199-A 型双凸透镜, 焦距为 200 mm; 柱面透镜使用 Thorlabs 公司的 LJ1728L1-A 型平凸柱面透镜, 焦距为 50.8 mm, 二者间距 20 mm。字符-A 表示镀 A 型增透膜 (350~700 nm), 在入射角为 8° 时, 膜层的反射系数低于 0.5%。多模光纤阵列的纤芯直径为 800 μm , 包层直径为 840 μm , 数值孔径为 0.37,

接收角为 21.7° , 光纤中心间距为 1 046 μm 。实验研究了扫描频率、扫描电压对实验结果的影响, 最终确定了最佳参数。



(a) 多模激光器光束的光强分布

(a) Intensity distribution of multimode laser beam



(b) 扫描光束的光强分布

(b) Intensity distribution of scanning beam

图 4 光束强度分布

Fig. 4 Intensity distribution of beams

3.1 扫描频率的影响

扫描镜的二维扫描是通过水平方向和竖直方向的简谐振动合成实现的。扫描轨迹的均匀性以及运动快慢决定光纤阵列输出光强的一致性和稳定性。轨迹的均匀性是指扫描点尽可能均匀、稠密地分布在矩形扫描范围内。这是因为系统透镜结构简单, 像差尤其球差和彗差^[16]较大。以水平扫描角 0° , 竖直扫描角从 $0 \sim 5^\circ$ 的情况为例, 绘制光斑在像面上的高度变化曲线, 如图 5 所示。根据图 5 分析, 如果扫描轨迹分布不均匀, 柱面透镜会聚的细光束各处高度变得不一致, 一些光纤可能收集了很多大扫描角度的光束, 从而导致耦合效率较低; 另一些光纤却只收集到小角度的扫描光束, 从而导致耦合效率较高, 各光纤的输出光强偏差由此增大。

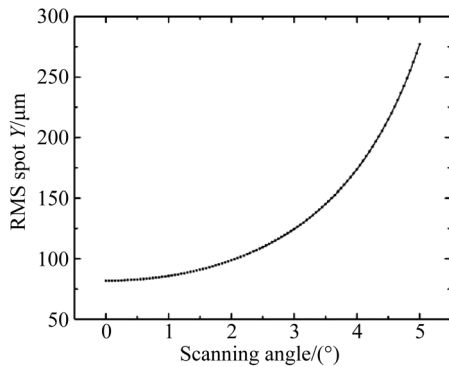


图5 光斑高度随竖直扫描角的变化曲线

Fig.5 Curve of beam height vs. y scanning angle

光强的稳定性是指光纤出射光功率长时间维持稳定,并且人眼观察不到光的闪烁。设水平扫描的周期为 T_x , 竖直扫描的周期为 T_y , 合成的扫描轨迹周期为 T , 则 T 等于 T_x 和 T_y 的最小公倍数。当 T_x 和 T_y 至少有一个为无理数且二者不存在倍数关系时, T 为无穷大, 光纤出射光功率的起伏较大。当 T_x 和 T_y 为有理数时, 合成轨迹形成李萨如图形, 光纤的输出光斑以图形的频率 f 脉冲闪烁。当闪烁光的频率超过某一数值时, 人眼将闪烁光知觉为稳定光, 这一频率称为临界闪烁频率。由于多模光纤本身的脉冲展宽效应, 根据临界闪烁频率的规律^[17], 闪烁脉冲宽度越大, 临界闪烁频率越小, 实验中观察到 $f=30$ Hz 时光纤的输出光斑无闪烁感。设水平扫描频率 $f_x = a \times f$, 竖直扫描频率 $f_y = b \times f$, 为了满足光纤阵列输出光强的一致性, 李萨如图形应该尽可能的稠密, 即 a 和 b 足够大。由于扫描振镜的机械振动限制, 这里设定 $f_x = 330$ Hz, $f_y = 300$ Hz。

3.2 扫描电压的影响

前文已经得出, 扫描角越大散斑抑制效率越高的结论。然而扫描角增大的同时, 光学系统的像差也随之增大, 像面上光束弥散变得严重, 反而会降低光纤耦合效率。实验测量了在光纤的最佳耦合位置处细光束的高度 $4\sigma_y$ 值和放置于光束中央位置处的一根光纤输出功率 P 随扫描电压峰值 V_{pp} 的变化, 以及 V_{pp} 和扫描半角 θ 的关系, 见表1。

表1 扫描半角 θ 、细光束高度 $4\sigma_y$ 以及光纤耦合光功率 P 与扫描电压峰-峰值 V_{pp} 的关系

Tab.1 Relationship between half-scanning angle θ , beam height $4\sigma_y$, fiber output power P and scanning voltage peak-to-peak value V_{pp} , respectively

V_{pp}/mV	$4\sigma_y/\mu\text{m}$	$P/\mu\text{W}$	$\theta/(\text{^\circ})$
100	392	213	0.43
200	425	213	0.93
300	477	215	1.43
400	560	212	1.79
500	633	209	2.29
600	678	205	2.86
700	835	193	3.22
800	980	168	3.72

半导体激光器的电流控制在 200 mA, 温度为 25° 。通过测量距扫描镜 200 mm 处扫描光束的高度计算扫描半角。因肉眼观察精度不足, 测量误差略大。应用回归分析计算出扫描角为 $4.7(\text{^\circ})/\text{V}$ 。从表1中能明显看出, 光斑高度随着扫描角的增大而增大。但是定量地给出光束高度与扫描角的关系却很困难, 因为 $4\sigma_y$ 值是由全部扫描光斑叠加统计计算获得的。

根据 Zemax 的仿真结果, 当扫描电压为 800 mV 时, 光线到光纤的最大入射角为 17.6° , 满足光纤的耦合条件, 因此光纤耦合效率主要由细光束高度决定。表1显示, 当 $4\sigma_y < 800 \mu\text{m}$ 时, 输出功率 P 伴随着微小误差整体小幅下降, 这是因为在半径 $4\sigma_y$ 以外, 光强虽然较小但不能完全忽略, $4\sigma_y$ 越大光纤纤芯区域包围的能量越小, 耦合效率会小幅度降低。当 $4\sigma_y > 800 \mu\text{m}$ 时, 光斑的能量集中区面积大于纤芯, 因此输出功率快速下降。为了兼顾耦合效率和散斑抑制效率, 本文制定 95% 的最大耦合比阈值, 从而确定扫描电压为 600 mV。

3.3 其他因素的影响

将半导体激光器温度控制在 25° , 电流设为 200 mA, 测量了 20 min 内激光器的平均功率为 39.049 mW, 功率漂移约为 0.73%。设定水平扫

描频率为 330 Hz, 扫描电压为 600 mV, 竖直扫描频率为 300 Hz, 扫描电压为 600 mV。光纤阵列从左到右的输出功率在 20 min 内完成测量, 结果如图 6 所示。

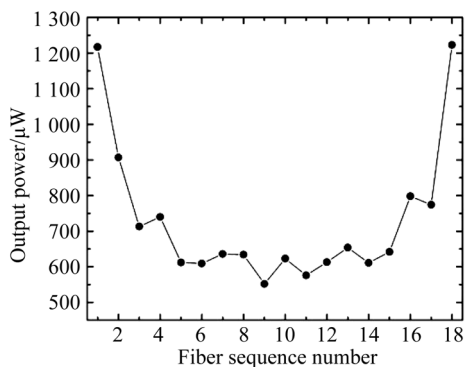


图 6 光纤阵列的输出功率

Fig. 6 Output power of fiber array

图 6 显示, 光纤阵列的输出功率一致性比较差, 表现为功率分布不对称, 且两端功率比中间高。这种现象也可以从图 4(b) 直观地观察到, 这是因为扫描点不是匀速运动, 而是简谐振动。在两侧端点处光斑运动速度最慢, 停留时间久, 光纤收集光能多; 而在振动的平衡位置附近光斑运动速度最快, 停留时间短, 光纤收集光能较少。对于扫描振镜来说, 这是无法避免的, 只能通过舍弃两端能量偏高的光束以降低各光纤输出功率的偏差。其次, 光纤阵列本身存在对齐误差, 如图 7 所示。



图 7 光纤阵列实物图

Fig. 7 Photo of fiber array

那些局部对齐误差较大的地方, 耦合光功率就会出现波动, 例如图 6 中的第 3、第 11、第 14 和第 15 号光纤, 其光功率处于局部极值。只有提高光纤阵列的制造工艺, 才能尽可能减小该影响。采用离散系数 C_v 来表征功率分布的一致性, 即有:

$$C_v = \frac{\text{样本标准差}}{\text{样本平均值}} \quad (8)$$

取 5 号至 15 号这段功率分布紧密的部分, 计算出它们的平均功率为 674.13 μW , 离散系数为 16%。

图 6 中 18 根光纤的总输出功率为 13.134 mW, 系统光损达到 66.37%。导致系统光损的主要原因有两个: 一是扫描镜未镀膜, 而光束入射角约为 45° , 反射损耗严重, 实验测得扫描镜在静止时的光损已达到 23.53%; 二是光纤间隔较大, 如图 7 所示, 而扫描光束呈连续性分布如图 4(b) 所示, 一部分能量不能耦合到光纤中。

最后实验测量了此系统的散斑抑制效率, 实验光路图如图 8 所示。单根光纤的出射端紧靠匀光管, 匀光管和散射片代替背光板中的导光设备和散射板。匀光管呈锥形, 入射孔径为 3.5 mm \times 3.5 mm 的矩形, 长度为 140 mm, 出射孔径为 8.16 mm \times 4.74 mm 的矩形, 散射片的散射半角为 15° 。成像镜头焦距为 35 mm, 光圈数取 22.6, CCD 积分时间设置为 200 ms, 散射片到镜头的距离为 45 mm。测得 11 根光纤的散斑图片在竖直扫描开启前后的平均散斑对比度分别为 0.341 和 0.162。其中, 处于细光束中间位置处一根光纤的散斑抑制效果如图 9 所示。

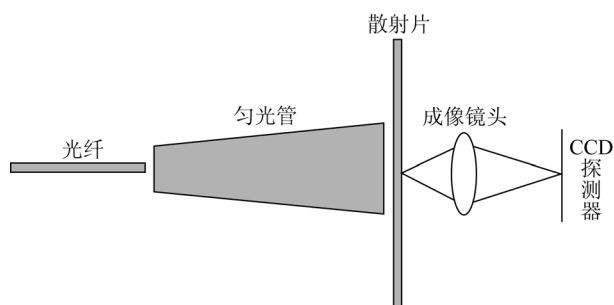
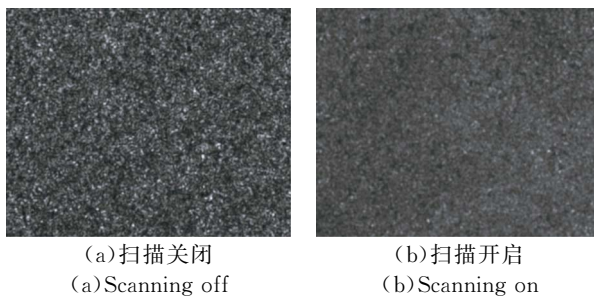


图 8 散斑测量系统

Fig. 8 Schematic diagram of speckle measurement system



(a) 扫描关闭
(a) Scanning off
(b) 扫描开启
(b) Scanning on

图 9 扫描开启前后散斑图片

Fig. 9 Speckle patterns before and after scanning

4 结 论

基于扫描振镜,本文设计了一种激光液晶电视的消散斑分光系统,成功地将激光束耦合进光纤阵列中,从实验上证实了该系统应用于液晶电视的可行性。配合光源部分的其他散斑抑制系统,有望将散斑对比度降低到4%以下。

参考文献:

- [1] 黄子强. 液晶显示原理[M]. 北京:国防工业出版社, 2008.
HUANG Z Q. *Principle of Liquid Crystal Display* [M]. Beijing: National Industry Defense Press, 2008. (in Chinese)
- [2] 李继军, 聂晓梦, 甄威, 等. 显示技术比较及新进展[J]. 液晶与显示, 2018, 33(1):74-84.
LI J J, NIE X M, ZHEN W, *et al.*. New developments and comparisons in display technology [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2018, 33(1):74-84. (in Chinese)
- [3] 季洪雷, 周青超, 潘俊, 等. 量子点液晶显示背光技术[J]. 中国光学, 2017, 10(5):666-680.
JI H L, ZHOU Q CH, PAN J, *et al.*. Advances and prospects in quantum dots based backlights [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(5):666-680. (in Chinese)
- [4] 付瀚毅, 刘伟奇, 柳华, 等. 高清激光显示中的色彩复现系统[J]. 光学精密工程, 2014, 22(7):1774-1780.
FU H Y, LIU W Q, LIU H, *et al.*. Color-recurrent system in high-definition laser display [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(7):1774-1780. (in Chinese)
- [5] DKUDA Y, DNODA K, FUJIEDA I. Laser backlight unit based on a leaky optical fiber [J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(7):4001-4009.
- [6] FUJIEDA I, ARIZONO K. Backlight units based on light extraction from a curved optical fiber [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(6):065104.
- [7] 王志平, 曹银花, 刘友强, 等. 蓝光激光二极管平板显示背光模组设计[J]. 中国激光, 2017, 44(5):194-200.
WANG ZH P, CAO Y H, LIU Y Q, *et al.*. Design of blue laser diode flat-panel display backlight module [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(5):194-200. (in Chinese)
- [8] 周羲君, 冯仕猛. 均匀照明 LED 背光板设计[J]. 液晶与显示, 2012, 27(6):774-779.
ZHOU X J, FENG SH M. Design of high uniformity LED backlight [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals & Displays*, 2012, 27(6):774-779. (in Chinese)
- [9] DAINTY J C, ENNOS A E, FRANÇON M, *et al.*. Laser speckle and related phenomena [J]. *Optica Acta International Journal of Optics*, 1976, 23(10):842-843.
- [10] CHANG R S, TSAI J Z, LI T Y, *et al.*. LED backlight module by lightguide-diffusive component [J]. *Journal of Display Technology*, 2012, 8(2):79-86.
- [11] FAN T Y. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2005, 11(3):567-577.
- [12] MA Q, XU C Q. Analysis of laser speckle reduction utilizing microlens-array-based projection screen [J]. *Journal of the Optical Society of America A Optics Image Science & Vision*, 2017, 34(9):1595-1601.
- [13] 廖廷彪. 光纤光学:原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2010.
LIAO Y B. *Fiber Optics: Principles and Applications* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010. (in Chinese)
- [14] TONG Z, SHEN W, SONG S, *et al.*. Combination of micro-scanning mirrors and multi-mode fibers for speckle reduction in high lumen laser projector applications [J]. *Optics Express*, 2017, 25(4):3795-3804.
- [15] KAJENSKI P J, FUHR P L, HUSTON D R. Mode coupling and phase modulation in vibrating waveguides [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2002, 10(9):1297-1301.

- [16] 郁道银,谈恒英. 工程光学[M]. 北京:机械工业出版社,2011.
YU D Y, TAN H Y. *Engineering Optics* [M]. Beijing: China Machine Press, 2011. (in Chinese)
- [17] 徐益勤,张宇宁,李晓华. 显示器件大面积闪烁视觉生理基础与改善方法[J]. 电子器件, 2008, 31(5):1417-1420.
XU Y Q, ZHANG Y N, LI X H. Physiology analysis and reduction method for large area flicker of displays [J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2008, 31(5):1417-1420. (in Chinese)
- [18] 张建萍,冯秀恒,黄廉卿,等. 数字 X 线影像仪的激光扫描光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2008, 16(2):202-207.
ZHANG J P, FENG X H, HUANG L Q, et al. . Design of laser scanning optical system for computed radiography [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(2):202-207. (in Chinese)

作者简介:



宋少华(1989—),男,山西忻州人,硕士研究生,2012年于杭州电子科技大学获得学士学位,主要从事激光散斑抑制的研究。E-mail: eisenhower0304@qq.com

导师简介:



全召民(1982—),男,河南南阳人,博士,副教授,硕士生导师,2005年、2008年于中北大学分别获得学士、硕士学位,2013年于挪威科技大学获得博士学位,主要从事激光显示和 MEMS 的研究。E-mail: zhaomin.tong@sxu.edu.cn