

投影用二维激光光源模块的设计和优化

张运方^{1,2} 李慧^{1,2} 董辉^{1,2} 孔庆善^{1,2} 施安存^{1,2} 段靖远^{1,2} 方青^{1,2} 刘育梁^{1,2}

(¹ 中国科学院半导体研究所光电系统实验室, 北京 100083)
² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 设计了一种大功率、小体积、可有效降低散斑的投影用二维激光光源模块。该激光光源模块由二维激光二极管(LD)阵列和微透镜阵列两部分组成,不需要其他光学器件,可直接获得均匀的矩形照明光斑。使用 Zemax 软件建立了具体的模型,分别分析了 LD 的发散角、个数、间距以及光束经透镜后发散角等参数对光能利用率、光束形状、光斑大小、光束照明位置以及光束均匀性的影响。根据理论分析设计了一种用于液晶显示器(LCD)投影系统的二维激光光源模块。

关键词 光学设计;激光光源模块;多高斯光束;半导体激光器阵列;投影显示

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1016001

Design and Optimization of Two-Dimensional Laser Source Used for Projection

Zhang Yunfang^{1,2} Li Hui^{1,2} Dong Hui^{1,2} Kong Qingshan^{1,2} Shi Ancun^{1,2}

Duan Jingyuan^{1,2} Fang Qing^{1,2} Liu Yuliang^{1,2}

(¹ Optoelectronic Systems Laboratory, Institute of Semiconductor,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)
(² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract A two-dimensional laser source with high power, small size and the ability to suppress speckle noise is designed for projection. This laser source module is composed of an array of laser diodes and a lens array which can realize uniform rectangular beam without other optical elements. The source module is built in Zemax software. The influences of the factors including the divergence angle, the number, the interval of laser diode (LD), and the beam divergence angle after the micro lens on the light efficiency, the beam size, the illumination distance and the beam uniformity are studied. A two-dimensional laser source module for liquid crystal display (LCD) projection is built based on theoretical analysis.

Key words optical design; laser source module; multi-Gaussian beam; semiconductor laser array; projection display

OCIS codes 220.2945; 220.4289; 220.4830

1 引言

传统投影系统往往采用高压汞灯或发光二极管(LED)作为光源^[1-3],这些光源存在亮度低、寿命短、色域窄、光效低等一些难以克服的缺点。和传统的光源相比,激光具有更高的亮度、更高的光效、更宽的色域以及更好的方向性和单色性,是投影显示的理想光源^[4]。然而传统大功率激光器的体积很大。为得到均匀矩形照明光斑,需要复杂的匀光系

统和中继系统。另外由激光相干性导致的散斑现象严重影响了投影图像的质量。这些因素都限制了激光投影的广泛应用。

为发挥激光投影的优势,研究人员做了很多工作来缩小激光器体积、简化照明光路以及消除激光散斑。近年来,有很多关于大功率小体积激光模块的报道^[5-7]。在文献[5]中,通过对激光二极管(LD)进行二次封装,组成了12 W红光激光模块和

收稿日期: 2013-03-28; 收到修改稿日期: 2013-05-20

基金项目: 中国科学院半导体研究所知识创新项目(Y1S1010000)

作者简介: 张运方(1986—),男,博士研究生,主要从事投影显示方面的研究。E-mail: zhangyf10@semi.ac.cn

导师简介: 刘育梁(1966—),男,研究员,博士生导师,主要从事光电子学方面的研究。E-mail: ylliu@semi.ac.cn

9 W 蓝光激光模块。Sony 公司和 Modulight 公司也分别推出了 7.2 W 和 7 W 的红光激光模块。这些激光模块直接输出或通过光纤耦合间接输出,相比传统固体激光器具有大功率小体积的优点。但用于投影时,同样需要经过复杂的光路系统才能得到所需的矩形光斑。为了省略复杂的匀光和整形系统,光源的输出光斑形状、大小、发散角、均匀性必须和显示芯片相匹配。目前在这方面的研究比较少。在散斑消除方面,研究人员也提出了很多方法^[8-12],比如在光路中加入动态的散射或衍射元件^[8-9]、使用动态屏幕^[10]或者旋转的积分棒^[11]。这些方法在一定程度上降低了散斑现象,但同时也不可避免地带来了光能的损失。因此如何能同时解决上面的几个问题是研究的重点。

本文提出了一种激光光源模块由 LD 阵列和微透镜阵列。模块不仅具有功率大、体积小的优点,而且在不引起光能损失的情况下,可通过降低激光的空间相干性来抑制散斑。另外模块可直接输出矩形均匀的照明光斑,从而省略了复杂的匀光和整形光路系统。首先在 Zemax 软件中建立了具体的二维激光光源模型,并分析了 LD 发散角 θ_1 , LD 个数 M 、 N , LD 之间的间距 d , 光束经透镜后发散角 θ_2 等参数对光能利用率, 光束形状、大小, 光束照明位置以及光束均匀性的影响。根据理论分析, 设计了一个

用于液晶显示器(LCD)投影系统的二维激光光源模块。

2 激光光源模块的结构和原理分析

图 1(a)给出了激光模块的布局图,它包括 LD 阵列和微透镜阵列两部分。LD 按照矩形进行二维排布;LD 阵列发出的光经过微透镜阵列适当压缩后,在距离 L 处相互叠加,形成具有平顶结构的多高斯光束(MGB)。图 1(b)给出了 L 处 MGB 的光强分布伪彩色图,图 1(c)是相应横向的光强分布曲线。基于临界照明的原理,激光光束在远场相互叠加形成矩形的均匀光斑。这和采用积分棒或复眼结构的柯拉照明系统有着本质的区别。

由图 1(c)可见,MGB 光强在边缘处逐渐下降,在中间区域均匀分布。当用于投影系统中时,如果 MGB 边缘部分光强下降坡度很陡,中心部分光束均匀分布,并且光斑大小以及发散角都和显示芯片匹配,那么光斑就可直接照射到显示芯片上。这样就省略匀光系统、整形系统以及中继系统等复杂的光路。因此用于投影系统中时,MGB 必须满足以下几个条件:1) 尺寸和显示芯片相匹配;2) 发散角和显示芯片 F 数相匹配;3) 均匀性要尽可能好;4) 光斑的光能利用率 η (均匀分布的光束能量和总能量的比值)尽可能高。

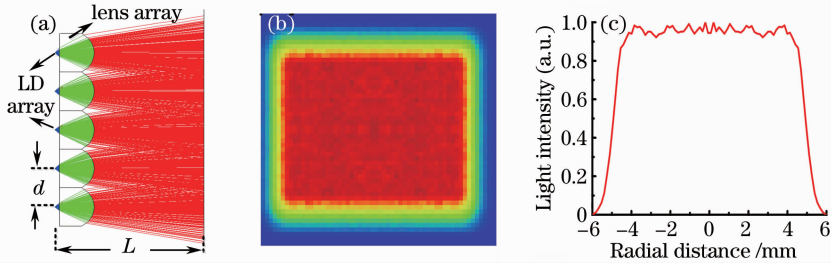


图 1 二维激光光源模块。(a) 模块布局图;(b) 光强分布伪彩色图;(c) 横向光强分布曲线

Fig.1 Two-dimensional laser source module. (a) Arrangement of module; (b) pseudo-color map of light intensity; (c) transverse light intensity distribution curve

通过分析光束的传播规律,可以得到影响 MGB 性能的参数。MGB 的电场强度在 $x-z$ 平面内的传播特性可表示为^[13]

$$E(z) = E_0 \frac{\sum_{n=-N}^N f_n \exp\left\{-\left[\frac{z - ndA}{\omega_0(A^2 + B^2/z_R^2)^{1/2}}\right]^2\right\} \exp\left[-i \frac{k}{2} \left(\frac{AC + BD/z_R^2}{A^2 + B^2/z_R^2}\right) \left(z - \frac{ndB/z_R^2}{AC + BD/z_R^2}\right)\right]}{\sum_{n=-N}^N \exp(-n^2)}, \quad (1)$$

式中 $f_n = \frac{\exp\{(i/2)\arctan[B/(Az_R)]\}}{A^2 + B^2/z_R^2} \exp\left[-in^2 \left(\frac{BC/z_R}{AC + BD/z_R^2}\right)\right]$; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为波数; z 为传播距离; $z_R = \frac{\pi\omega_0^2}{\lambda}$ 为瑞利高度; A 、 B 、 C 、 D 为传输矩阵中的元素; d 为 LD 之间的间距; ω_0 为 LD 的腰斑半径; N 为 LD 的个数。

结合(1)式以及光束的传播规律,可知光斑的性能取决于以下几个参数: LD之间的间距 d , LD的行数 M 和列数 N ,光束的传播距离 L ,单个 LD的发散角 θ_1 ,以及光束经过微透镜阵列后的发散角 θ_2 。接下来的部分中,使用 Zemax 软件建立了二维激光光源模块模型,并分析了各个参数对 MGB 性能的影响。

3 影响多高斯光束性能的参数

首先分析影响光斑光能利用率 η 的因素。由于光斑直接照射到显示芯片上,只有中间均匀的部分能被有效利用,因此光能利用率可定义为中间均匀部分能量 E_U 和 E_r 总能量的比值。以 $U = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$ 来表示光束的均匀性,其中 I_{\max} 和 I_{\min} 分别为光斑最高和最低的能量。并且当 $U \leq 10\%$ 时认为是均匀的。图 2 是 MGB 归一化横向光能分布曲线。点 A 和 A' 对应的光强值为 0.818,此时 $U=10\%$,因此 AA' 之间的平顶部分(W)认为是均匀的。点 A 和 A' 两侧部分(图中阴影部分)的光能不能被利用。显然 MGB 边缘缓降的特征是导致光能损失的主要因素。边缘越陡峭,光斑的光能利用率越高。用边缘宽度 D (光斑能量下降到最高值 e^{-2} 时的边缘宽度)来表征边缘的陡峭程度。通过(1)式,可知 MGB 的宽度 $D \approx 0.38\theta_1^{[13-14]}$,其中 θ_1 为 LD 的 e^{-2} 发散角。可见单个 LD 的发散角越小,边缘越陡峭,光能利用率越高。

激光二极管的个数 (M 或 N) 是影响光能利用率的另外一个因素。图 3 给出了光能利用率和 LD 个数之间的关系。可以看出随着 LD 个数的增加,光能利用率逐步提高,最终趋于饱和。这是由于

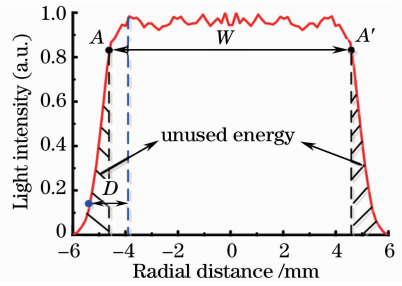


图 2 MGB 横向光能分布曲线

Fig. 2 Transverse light intensity distribution curve of MGB

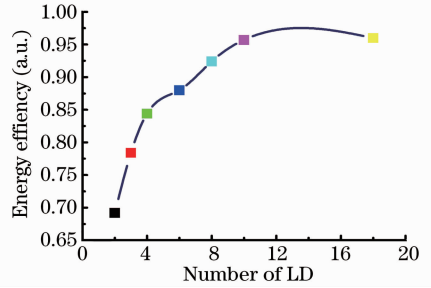


图 3 光能利用率和 LD 个数的关系

Fig. 3 Relationship between light efficiency and number of LD

处于 MGB 边缘处的能量损失,当 LD 个数增加时,损失的光能所占的比例也随之减小。

另外,根据 MGB 的传播规律可知,光束传播距离 L 对光能利用率也有影响。传播距离越远,平顶尺寸 W 越小,光能利用率越小。图 4(a)和图 4(b)分别给出了不同距离处,MGB 能量分布的伪彩色图,横向平顶区域大小以及光能利用率。当传播距离为 6 mm 时,光斑的平顶尺寸和光能利用率分别为 9.16 mm 和 91.4%。当传播距离增加到 18 mm 时,平顶尺寸减小为 7.2 mm,光能利用率下降为 72.6%。

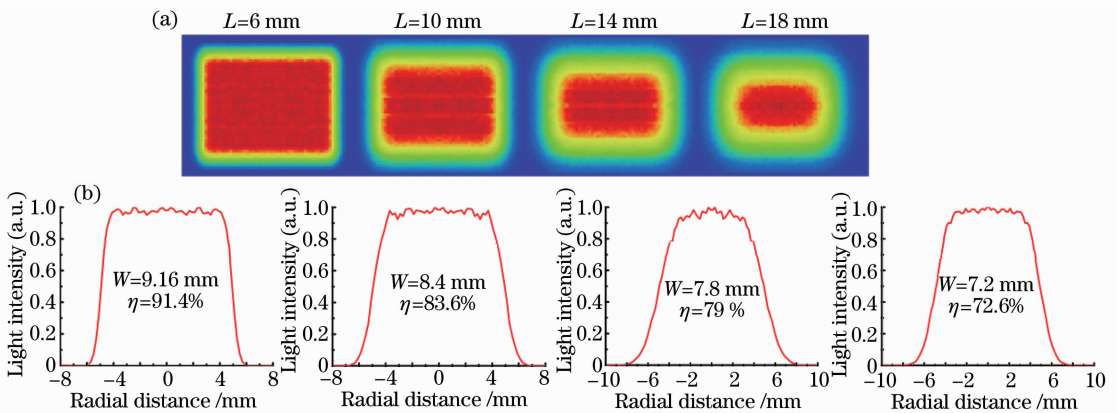


图 4 (a) 不同距离处 MGB 能量分布伪彩色图;(b)不同距离处 MGB 的平顶尺寸以及光能利用率

Fig. 4 (a) Pseudo-color maps of MGB energy distribution with different distances; (b) top size and light efficiency of MGB with different distances

由以上分析可见,为了得到尽可能高的光能利用率,应使用发散角尽可能小的 LD,尽可能增加 LD 的个数,而且要考虑传播距离的影响。其次考虑影响 MGB 输出光斑大小的因素。根据高斯光束的叠加理论,在腰斑平面上 MGB 的宽度 W (平头尺寸) 和 LD 之间的间距 d 存在如下关系^[14]:

$$d = \frac{W}{N + \left\{ 1 - \ln \left[\sum_{n=-N}^N \exp(-n^2) \right] \right\}^{1/2}}, \quad (2)$$

因此通过调整 LD 之间的距离 d 和 LD 的个数 N 就可以得到所需的腰斑宽度 W 。例如要得到腰斑宽度 $W = 10 \text{ mm}$ 时,当间距 $d = 0.5 \text{ mm}$ 时,所需要

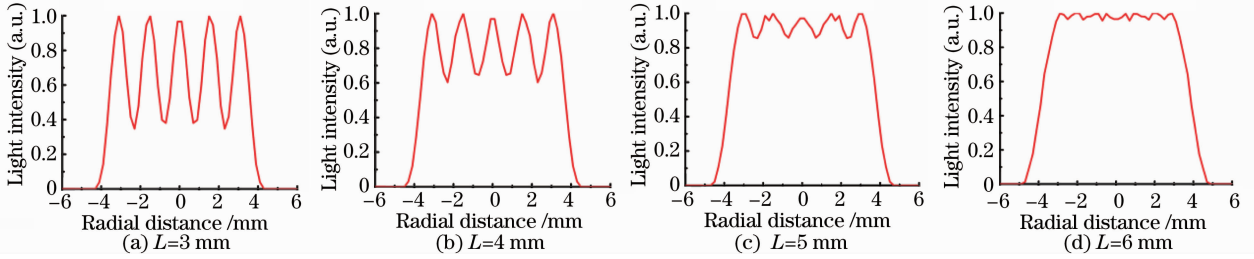


图 5 不同传播距离处 MGB 光斑能量分布曲线

Fig. 5 Energy distribution curves of MGB with different propagation distances

根据上面的分析可以得出以下结论:1) 光能利用率取决于 LD 的发散角 θ_1 , LD 的个数 N 以及传播的距离 L 。LD 发散角越小, LD 个数越多光能利用率从越高。并且存在一个最佳的传播距离使得光能利用率最高。2) 光斑的尺寸和形状取决于 LD 排列方式, LD 的个数以及 LD 之间的间距。3) 光斑的均匀性以及最佳的照明位置取决于激光器之间的间距 d , 光束经微透镜后的发散角 θ_2 。

4 激光模块的仿真设计

基于上面的结论,设计了一种用于 LCD 投影系统的激光光源模块。假设显示芯片的尺寸为 0.7 inch ($1 \text{ inch} = 2.54 \text{ cm}$), 长宽比为 $16:9$ ($W = 8.7 \text{ mm}, L = 15.5 \text{ mm}$), F 数为 2.4 。所使用的 LD 波长为 635 nm ; 长短轴的发散角分别为 $\theta_1 = 35^\circ$, $\theta_2 = 10^\circ$ 。设计的目标是得到一个和芯片尺寸相匹配的均匀的照明光斑, 并且光束的发散角要在芯片的可接受范围内。

根据上面的分析可知 LD 之间的间距越小, 一定尺寸内可排布的激光器个数也越多, 模块的光能利用率就越高。然而在实际应用中要考虑 LD 的散热问题。实验中 LD 在横向和纵向的间距分别设为

LD 的个数大约为 20。

最后需要考虑影响光束的最佳照明位置以及光斑的均匀性的因素。实验中通过微透镜阵列来控制长轴和短轴的发散角 θ_2 , 从而控制光束的最佳照明位置。光斑的均匀性取决于光束的重叠程度。对于给定的参数, 只有一个最佳的重叠位置, 当传播距离小于最佳位置时, 光束的均匀性不能达到最佳。当传播距离大于最佳位置时, 光斑的光能利用率会降低。图 5 给出了不同传播距离处横向的光斑能量分布曲线。由图 4 和图 5 可知存在一个最佳传播距离, 光斑的均匀性和光能利用率都达到最佳。

0.52 mm 和 1.55 mm , 这样在保证激光器能正常工作的同时, 拥有较高的光能利用率。根据 (2) 式可知, 当目标尺寸为 8.7 mm 和 15.5 mm 时, 横向和纵向所需要的 LD 个数分别为 $M = 10$ 和 $N = 16$ 。另外由显示芯片的 $F = 2.4$, 可得芯片可接收光线的最大角度为 12° 。因此光束经过微透镜阵列后, 发散角要小于 12° 。由于 LD 短轴发散角小于 12° , 长轴发散角大于 12° 。因此实验中微透镜采用柱状微透镜, 只对长轴发散角进行压缩。最终长轴的发散角压缩到 10° 左右, 和短轴的发散角基本相同。

采用上述参数建立模型, 在传播距离 $L = 6 \text{ mm}$, 光束的均匀保持在 90% 的情况下, 光束的能量利用率达到最高。图 6(a)~(c) 给出了 MGB 光强分布伪彩色图以及横向和纵向的光强分布曲线。从图 6 可见, $M = 10, N = 16$ 时, 横向的照明尺寸为 7.5 mm , 纵向的照明尺寸为 14.5 mm , 得到的照明光斑尺寸小于目标尺寸。这是因为按照 (2) 式得到的是 MGB 的腰斑尺寸, 它和所需的照明尺寸存在一定的差别。当把 M 增加到 $11, N$ 增大到 19 时, 横向和纵向的照明尺寸增大为 9 mm 和 16 mm , 达到了目标要求, 如图 6(d)~(e) 所示。此时横向和纵向的光能利用率分别为 90% 和 93.4% 。

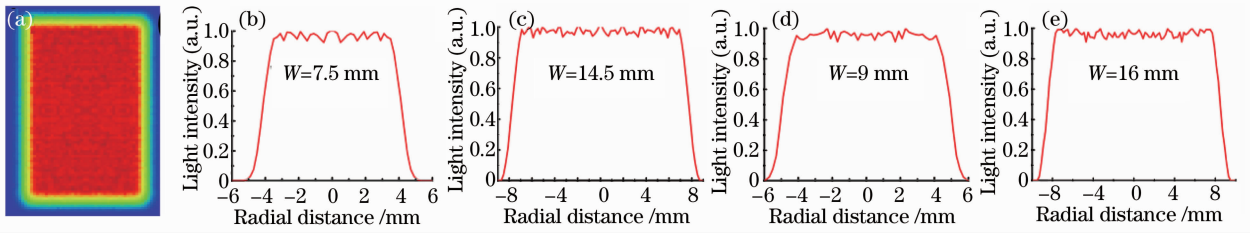


图6 传播距离为6 mm时的照明光斑。(a) $M=10, N=16$ 时的伪彩色图；(b) $M=10, N=16$ 时的横向光强分布曲线；(c) $M=10, N=16$ 时的纵向光强分布曲线；(d) $M=11, N=19$ 时的横向光强分布曲线；(e) $M=11, N=19$ 时的纵向光强分布曲线

Fig. 6 Illumination spot with propagation distance of 6 mm. (a) Pseudo-color map of illumination beam when $M=10, N=16$; (b) transverse light intensity distribution curve when $M=10, N=16$; (c) longitudinal light intensity distribution curve when $M=10, N=16$; (d) transverse light intensity distribution curve when $M=11, N=19$; (e) longitudinal light intensity distribution curve when $M=11, N=19$

该模块由209个LD芯片集成,整个芯片的面积只有 $9.36\text{ mm} \times 15.5\text{ mm}$ 。如果每个LD的功率是100 mW,那么整个模块的功率可达20.9 W。另外通过高斯光束的相互叠加,不需要匀光整形系统,在距离光源6 mm处可直接得到均匀的矩形照明光斑。当用于LCD投影系统时,由于不需要太长的后工作距,后工作距 $L=6\text{ mm}$ 能够满足要求,此时光斑可直接照射到显示芯片上;当用于硅基液晶(LCOS)或数字微镜元件(DMD)投影系统时可通过调节透镜参数来增大传播距离 L 。采用此模块的投影系统,不仅极大地减小了整个系统的体积,同时也具有较高的光能利用率。设置合适的参数后,横向和纵向的光能利用率分别为90%和93.4%,远远大于文献[15—16]中报道的光能利用率(小于81%)。另外该模块还能够很大幅降低激光的空间相干性,从而减弱散斑效应。这是由于每个LD都可以认为是独立的,产生的散斑也可以认为是独立的,散斑就得到了消除,在文献[5,8]中详细论述了散斑消除原理。因此这种激光模块是投影系统的理想光源。

通过上面的理论仿真,在理想的情况下,得到了很好的结果。但在实际生产制造过程中,很多因素比如激光器阵列封装工艺的精度,激光器阵列和透镜阵列的匹配精度,整体模块的热效应等,都会对激光模块的性能产生影响。从目前的工艺水平来看,后两个因素是影响模块性能的主要原因。实际制造中除了考虑上述因素外还要考虑成本因素。

5 结 论

提出了一种投影用二维激光光源模块。该模块由LD阵列和微透镜阵列组成,不仅具有功率大、体积小、可抑制散斑等优点,而且可直接输出均匀的矩

形照明光斑。在Zemax软件中建立了具体的二维激光光源模型,并分析了LD发散角 θ_1 ,LD个数 M, N ,LD之间的间距 d ,光束经透镜后发散角 θ_2 等参数对光能利用率,光束形状、大小,光束照明位置以及光束均匀性的影响。结果表明,LD发散角越小,LD个数越多,光能利用率越高;LD按矩形进行二维排布,并通过柱状透镜阵列对光束进行压缩处理,在一定的传播距离处可得到所需的均匀矩形照明光斑。最后根据理论分析,设计了一种用于LCD投影系统的二维激光光源模块。LD横向和纵向的间距分别为0.52 mm和1.55 mm;横向和纵向的LD个数分别是19和11;在传播距离6 mm处,得到了0.7 inch的矩形光斑(16:9)。在光斑均匀性大于90%的范围内,光能的利用率大于90%。该光斑可直接照射到显示芯片上,从而大幅缩小投影系统体积,提高系统光能利用率。

参 考 文 献

- 1 Y Zhen, Z Ye, F Yu. Ultrahigh-performance lamp illumination system with compound parabolic retroreflector for a single liquid-crystal-on-silicon panel display [J]. *Opt Eng*, 2007, 46(5): 054001.
- 2 A J Whang, Y Chen, Y Teng. Designing uniform illumination systems by surface-tailored lens and configurations of LED arrays [J]. *J Display Technol*, 2009, 5(3): 94—103.
- 3 G Harbers, S J Bierhuizen, M Krames. Performance of high power light emitting diodes in display illumination applications [J]. *J Display Technol*, 2007, 3(2): 98—109.
- 4 K V Chellappan, E Erden, H Urey. Laser-based displays: a review [J]. *Appl Opt*, 2010, 49(25): F79—F98.
- 5 Y Zhang, H Dong, Rui Wang, *et al.*. Demonstration of a home projector based on RGB semiconductor lasers [J]. *Appl Opt*, 2012, 51(16): 3584—3589.
- 6 B Sumpf, M Zorn, R Staske, *et al.*. 3-W broad area lasers and 12-w bars with conversion efficiencies up to 40% at 650 nm [J]. *IEEE J Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(5): 1188—1193.

- 7 N Shimada, M Yukawa, K SHibata, *et al.*. 640 nm laser diode for small laser display[C]. SPIE, 2009, 7198: 719806.
- 8 Y Zhang, H Dong, J Duan, *et al.*. Efficient suppression of the laser speckle in the laser projection system[C]. SPIE, 2012, 8335: 833512.
- 9 L Wang, T Tschudi, T Halldörsson, *et al.*. Speckle reduction in laser projection systems by diffractive optical elements[J]. Appl Opt, 1998, 37(10): 1770—1775.
- 10 S C Shin, S S Yoo, S Y Lee, *et al.*. Removal of hot spot speckle on laser projection screen using both the running screen and the rotating diffuser[J]. Displays, 2006, 27(3): 91—96.
- 11 M J Sun, Z K Lu. Speckle suppression with a rotating light pipe [J]. Opt Eng, 2010, 49(2): 024202.
- 12 J W Goodman. Some fundamental properties of speckle[J]. J Opt Soc Am, 1976, 66(11): 1145—1150.
- 13 A A Tovar. Propagation of flat-topped multi-Gaussian laser beams[J]. J Opt Soc Am A, 2001, 18(8): 1897—1904.
- 14 Y Jiang, H Yan, X Zhang. Beam-shaping method for uniform illumination by superposition of tilted Gaussian beams[J]. Opt Eng, 2010, 49(4): 044203.
- 15 H Murat, A Avci, R Beernaert, *et al.*. Two LCOS full color projector with efficient LED illumination engine [J]. Display, 2009, 30(4-5): 155—163.
- 16 H Murat, H De Smet, D Cuypers. Compact LED projector with tapered light pipes for moderate light output applications [J]. Display, 2006, 27(3): 117—123.

栏目编辑:张 腾