

新型激光投影显示方棒照明系统的设计

董辉 张运方 李慧 方青

(中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

摘要 以非成像理论中光学扩展量的传递规律为依据,给出了激光二极管(LD)阵列作为光源的新型激光投影显示系统中方棒照明光路元器件尺寸及入射光束孔径角的确定方法。选用 3×8 红光LD阵列作为光源,0.45 inch (1 inch=25.4 mm)硅基液晶(LCOS)芯片为空间光调制器(SLM),应用光学设计软件Zemax给出了方棒照明系统的设计实例,包括LD阵列光源光束整形系统、方棒匀光系统、方棒中继系统的设计。结果显示方棒照明系统具有较高的光能利用率及较好的光斑均匀性。由此得出较高光能传递质量的新型激光投影显示系统中方棒照明系统的设计方法。

关键词 光学设计;非成像光学;激光投影显示;光学扩展量;方棒照明系统

中图分类号 TN94 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.012202

Light Pipe Illumination System Design for New Laser Projection Display

Dong Hui Zhang Yunfang Li Hui Fang Qing

(Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract In non-imaging optics, based on the characteristics of the transition of optical extension, the size of elements and beam aperture angles in light pipe illumination optical path of a new type of laser projection display system with the laser diode (LD) array as the light source are given. As an example, the light pipe illumination system design using standard optical design software Zemax is described. The source is 3×8 red LD array. The spatial light modulator (SLM) is a 0.45 inch (1 inch=25.4 mm) liquid crystal on silicon (LCOS). The design includes laser source beam shaping, light pipe uniformity system and the light pipe relay lens. Good performances of energy efficiency and beam uniformity are gotten. Then, the method to design light pipe illumination system with high quality of energy transition in the laser projection display system is shown.

Key words optical design; non-imaging optics; laser projection display; optical extension; light pipe illumination system

OCIS codes 220.2945; 140.2010; 140.3300

1 引言

在投影显示中,光源作为系统中的重要部件,其发光特性直接决定了投影显示系统的品质。激光具有亮度高、单色性好、波长固定等特点。彩色投影显示中用激光作为红绿蓝(RGB)三基色光源,基本可以完全模拟自然色彩,实现的图像层次感好、颜色饱和度高、亮度低且对比度高。以三个色品定点波长构成的色品空间能实现超色域的视觉效果,得到极佳的彩色图像显示。而目前显示产品的色域空间仅能覆盖人眼所能识别色域空间的31.8%,难以实现真实自然色彩的显示。为突破这一障碍,激光显示成为未来显示技术的发展方向和主流趋势。

随着激光这种新型光源的出现,非成像光学系统的设计在激光投影显示中开始发挥重要作用^[1],其中照明光路的设计是一项关键性技术。本文以激光二极管(LD)阵列作为光源,运用光学系统光学扩展量传递规

收稿日期: 2011-08-12; **收到修改稿日期**: 2011-09-10; **网络出版日期**: 2010-10-21

基金项目: 中国科学院半导体研究所知识创新工程(Y1S1010000)资助课题。

作者简介: 董辉(1981—),女,硕士,研究实习员,主要从事光学设计、激光投影显示、照相物镜设计等方面的研究。

E-mail: donghui1230@semi.ac.cn

律计算出方棒照明系统中元器件的尺寸、光束耦合角度等相关设计指标,并对结果进行了详细分析。

2 非成像光学

在投影显示光学引擎中照明系统的设计和分析是关键技术之一,研究的重点是如何提高光能利用率和照明均匀性。与成像系统不同,在照明光路设计中主要关注能量的传递,而几何成像光学理论虽然可以确定照明光斑的尺寸,并保证照明亮度均匀性,但是无法衡量系统的能量利用率。因此,有必要引入非成像光学作为照明系统设计的理论基础。

光学扩展量是非成像光学理论中的重要概念,用于描述有一定孔径角和截面积的光束的几何特性。其表达式为

$$E = n^2 \iint \cos \theta dA d\Omega, \quad (1)$$

式中 θ 为面积 dA 与立体角 $d\Omega$ 的中心轴之间的夹角,即光束孔径角。可见,光学扩展量是光束所通过的截面积与其空间立体角的积分。因此,如果光束经过光学系统后成像面积增加,则孔径角必须减小,否则会引起能量的损耗。

投影显示光学系统是扩展量受限系统^[2]。空间光调制器(SLM)限制整个系统的光学扩展量,因此需要优化集光面与光束孔径角的组合才能确保系统的能量利用率。扩展量近似简化表示为

$$E \approx \pi S \sin^2 \theta, \quad (2)$$

式中 S 为光束面积, θ 为光束孔径角。

3 激光光源整形系统

以 LD 阵列作为光源,光源结构如图 1 所示。这种结构不仅使得阵列光束达到空间紧密排布,而且有利于激光光束的消相干。由于 LD 光束快轴方向光斑尺寸大,慢轴方向光斑尺寸小,因此有必要对光束快轴方向进行准直整形。这里采用非球面镜准直的方法。以红色($\lambda=0.638 \mu\text{m}$)LD 阵列为例^[3],其中 LD 功率为 0.5 W,阵列排布 3(列) \times 8(行),发散角 $\theta_{//}=7.5^\circ$, $\theta_{\perp}=35^\circ$ [半峰全角(FAHM)]。设计光源非球面准直镜如图 2 所示。

表 1 非球面准直镜设计参数

Table 1 Design parameters of aspheric collimating lens

Parameter	Value
Radius 1	Infinity
Radius 2 /mm	-2.5771
Thickness /mm	3.02
Glass	ECO-550($N_d=1.606, V_d=50.27$)
Conic	-1.0857
P_4	-4.1116×10^{-3}
P_6	-1.1477×10^{-4}
P_8	3.4098×10^{-7}

表 1 为应用 Zemax 软件进行非球面准直镜设计的参数。物距为 2.9 mm,有效焦距为 4.27 mm,通光孔径为 7.2 mm,工作波长为 0.638 μm ,在 Afocal 像空间模式下优化,准直后光束发散角小于 1 mrad,符合设计要求。图 3 为经过反射镜阵列对光源尺寸压缩后的光斑亮度分布图。从图中可以看出,加入非球面准直透镜组后,光斑弥散明显减小,能量较为集中,有利于后面光学系统的设计。

阵列光束经反射镜阵列压缩后光源口径 $D=30 \text{ mm}$ 。配合系统 RGB 合光结构及后续方棒匀光系统的光束孔径要求,将光源光束口径进一步压缩至 19 mm。其中,两片透镜材料分别为平凸镜 H-LAK12 和双凹镜 H-F4。准直后光束发散角小于 1 mrad,准直度较好。

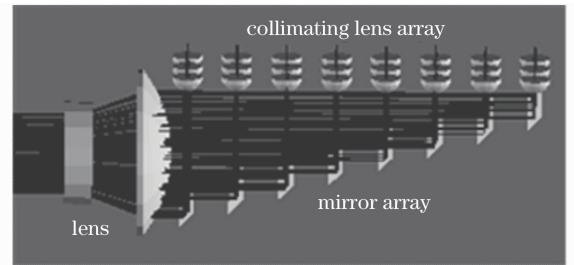


图 1 LD 阵列光源系统

Fig. 1 LD array source system

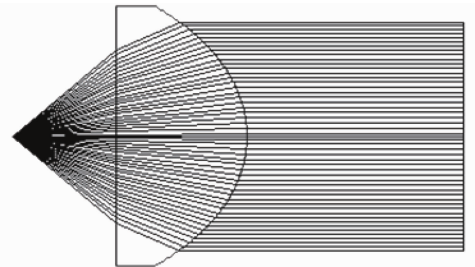


图 2 非球面准直透镜光路图

Fig. 2 Aspheric collimating lens light path

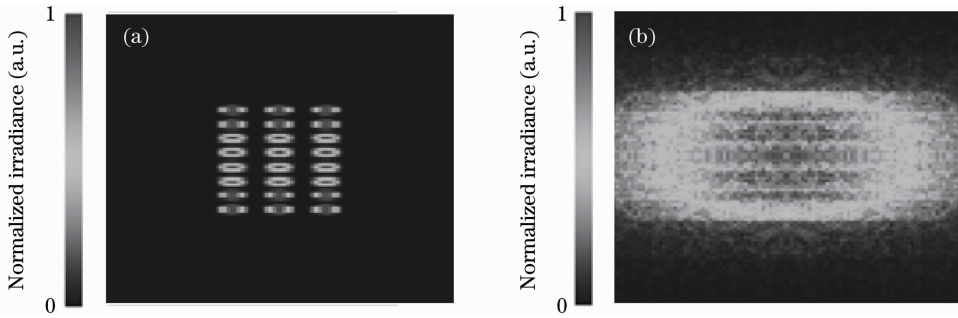


图3 反射镜阵列后光源亮度分布图。(a)加入非球面准直镜;(b)无非球面准直镜

Fig. 3 Irradiance after the mirror array for LD arrays (a) with and (b) without aspheric collimating lens array

4 匀光整形系统

空间光调制器对光斑均匀性要求较高,而光源光场强度分布并不均匀。因此,照明光路中需要加入匀场器件实现光斑强度的均匀化。在投影系统中通常使用复眼透镜或者积分方棒,在实现匀场的同时达到光斑整形的目的^[4]。出于加工成本及匀场效果的考虑,本文以空心方棒作为设计实例。积分方棒如图4所示,是可以将圆形光斑转化成方形光斑,并实现出射光斑均匀照明的匀光整形器件^[5]。由于其结构简单、便于加工,同时又能高效率、高均匀性地将光斑转化为方形光束,因此在投影显示中得到广泛的应用。通常,方棒的长宽比与空间光调制器芯片尺寸比例相同。光束在方棒内的传输类似于光纤传输。光束以一定角度入射,在积分方棒内经过多次反射达到匀光效果。光束每发生一次反射,就可以形成一个关于反射面对称的新的虚拟光源,经过多次反射后可将光源展开为二维光源阵列,如图5所示。方棒的长度决定了光场均匀性。在一定长度范围内,随着光束在方棒内反射次数的增加,照明光斑均匀性变好。当反射次数 $N=3$ 时,均匀性趋于饱和,反射次数继续增加会降低光能利用率。方棒尺寸及反射次数之间的关系为

$$N = \frac{L \tan \theta_{\max}}{\sqrt{h^2 + w^2}}, \quad (3)$$

式中 L 为方棒的长度, θ_{\max} 为光束在积分棒内的最大孔径角, h 和 w 分别表示方棒的高度和宽度。

光学扩展量衡量的是系统传输能量的能力。在投影系统中光源、照明系统、空间光调制器以及投影物镜要保证良好的光学扩展量匹配才能确保系统的光能利用率。在设计实例中,已知硅基液晶(LCOS)芯片 F 数为 2.5, 尺寸为 0.45 inch (1 inch=25.4 mm), 感光面积为 9.215 mm×6.915 mm。不考虑系统散射、吸收等能量损失的情况,系统光学扩展量守恒。积分棒 $h=3.7$ mm, $w=4.93$ mm, 则由(2)、(3)式可得 $L=42.4$ mm, $\theta=23.5^\circ$ 。实际光路设计中,由于方棒尺寸比例的因素,不能使相邻两面光束反射次数同时达到 3 次,为保证系统出射光束的均匀性,将(3)式中 $\sqrt{h^2 + w^2}$ 项改成 $\sqrt{2w^2}$ 来计算积分棒长度,得到 $L=48$ mm。

由第3节激光光源整形系统设计得到光源压缩光束口径为 19 mm。使用 Zemax 软件设计方棒前耦合镜组,得到耦合进方棒的光束孔径角(半角)为 23.45° , 满足设计要求。图6为加入方棒的匀光系统结构图。追迹 1000000 条光线,方棒后照度分布如图7所示。根据 9 点 ANSI 投影照明标准,计算方棒后光斑亮度分布均匀性得到 $U_+=96.5\%$, $U_-=-98.9\%$ 。此处系统光能利用率为 88.5%。

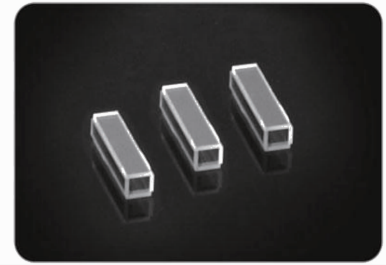


图4 积分方棒

Fig. 4 Light pipe

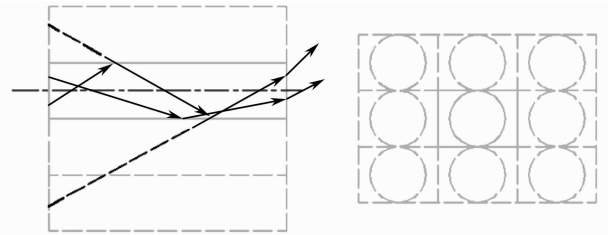


图5 方棒二维光源阵列展开示意图

Fig. 5 Diagram of two-dimensional light pipe expanding source array

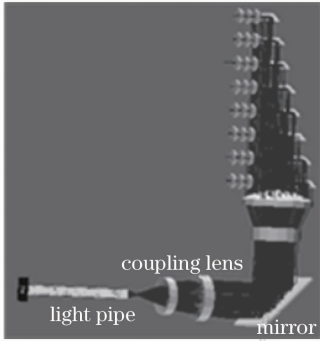


图 6 加入方棒后系统结构图

Fig. 6 System diagram after adding the light pipe

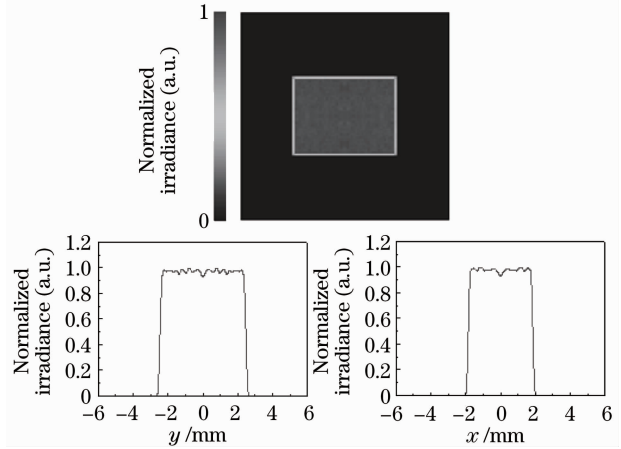


图 7 方棒后光斑照度图

Fig. 7 Illuminance after light pipe

5 方棒中继系统设计

在投影照明系统中,由于方棒的出光特性及系统结构的限制,无法将经过方棒后的匀场光束直接投射到空间光调制器芯片上。因此,需要一个中继系统实现这一目标。中继系统的作用是将匀场方斑按比例放大到空间光调制器上,本质上可将其看作转像系统。但是与成像系统设计不同,对像差校正要求不高,只要控制球差在一定范围内即可,重点保证系统照度指标。一般情况下,投影中继系统采用3~4片球面透镜的双远心结构^[6]即可达到系统照明光斑质量的要求。这里用3片透镜设计中继系统,如图8所示。结构参数如表2所示。

表 2 方棒中继系统结构参数

Table 2 Parameters of light pipe relay lens system

	Relay lens			
	1	2	3	4
Radius 1 /mm	-21.47	Infinity	19.05	Infinity
Radius 2 /mm	-6.50	-11.38	Infinity	Infinity
Thickness /mm	3.00	5.00	4.00	15.00
Glass	H-ZBAF5	H-LAK12	H-LAK12	H-LAK9

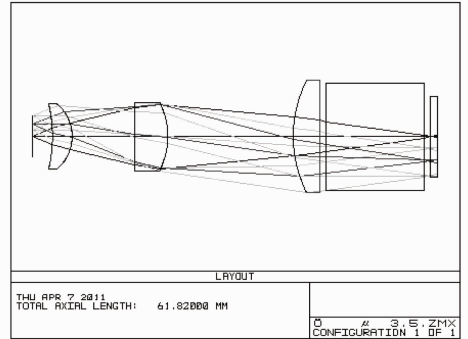


图 8 方棒中继系统光路结构

Fig. 8 Light path diagram of the light pipe relay lens system

系统物距为3 mm,物方孔径角与方棒耦合光束角度相同均为 23.5° , F 数为2.45,像面位置光束入射角度小于 12° ,远心度小于 0.3° ,满足LCOS芯片要求。最终的方棒照明系统结构如图9所示。追迹1000000条光线,得到LCOS照度分布如图10所示。根据9点ANSI投影照明标准,计算LCOS芯片上光斑亮度分布均匀性得到 $U_+ = 96.9\%$, $U_- = -96.4\%$ 。此时LCOS

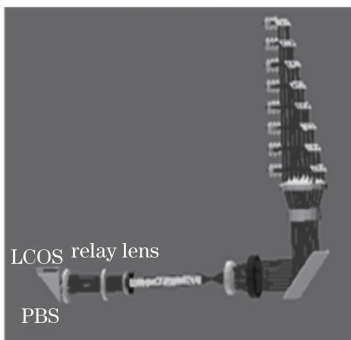


图 9 方棒照明系统

Fig. 9 Light pipe illumination system

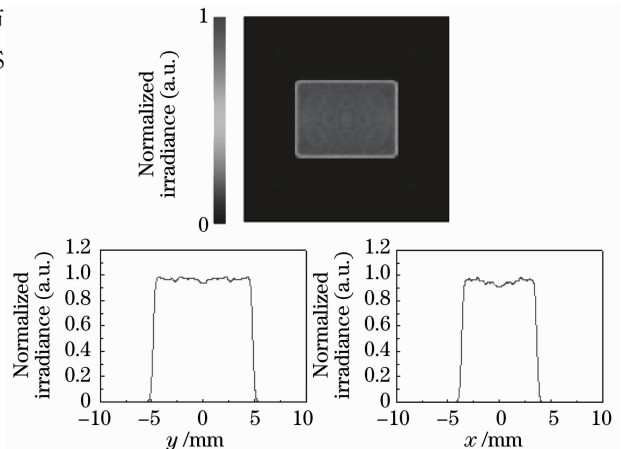


图 10 LCOS 光斑照度图

Fig. 10 Illuminance on the LCOS

前照明光路光能利用率达到 71.4%。

6 结 论

以 LD 阵列作为新型投影显示光源,给出了光源光束整形系统、匀光系统及中继系统的设计。由于投影系统是光学扩展量受限系统,根据系统中光学扩展量的匹配关系对光路进行设计,能够得到较高的光能传递质量。在应用 Zemax 软件设计的方棒照明系统中,LCOS 上光斑亮度均匀性达到 96.6%,光能利用率为 71.4%。可见,在照明光路设计中对每个光学元件的光学扩展量进行合理分配是非常必要的。

参 考 文 献

- 1 R. Winston. Nonimaging Optics[M]. New York: Academic Press, 1991. 26~81
- 2 Zhang Zengbao. Investigation on Optical Engine Applied to Projection Display System[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2004. 20~22
张增宝. 投影显示系统光学引擎研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2004. 20~22
- 3 Guo Mingxiu, Shen Guanqun, Lu Yutian. The technology of laser diode beam shaping[J]. *Laser Technology*, 2003, **27**(4): 357~361
郭明秀, 沈冠群, 陆雨田. 激光二极管光束整形技术[J]. *激光技术*, 2003, **27**(4): 357~361
- 4 Liu Xu, Li Haifeng. Modern Projector Display Technology[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2009. 121~136
刘 旭, 李海峰. 现代投影显示技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2009. 121~136
- 5 Lü Yong, Zheng Zhenrong. Analysis for optical extend in light-pipe illumination system[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2004, **30**(6): 569~571
吕 勇, 郑臻荣. 方棒照明系统的光学扩展量传递分析[J]. *北京航空航天大学学报*, 2004, **30**(6): 569~571
- 6 Zhou Jie. Studies on Theoretical Analysis and Application of the Optical Systems for Reflective Projection Displays[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005. 51~52
周 杰. 反射式投影显示光学系统的理论分析和应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005. 51~52