

# 基于渐变折射率透镜的激光投影仪照明光路设计

芮大为 林祖伦 祁康成 刘 旂 李国栋

(电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054)

**摘要** 照明光路是决定投影仪光学引擎的光能利用率和光学体积的主要因素。传统照明光路针对朗伯光源进行收集与分配,无法从根本上消除系统光效低和体积大的缺点。设计了一种基于渐变折射率(GRIN)透镜阵列的单片式数字光处理(DLP)激光投影光学引擎的照明光路,以单级透镜系统取代了传统的聚光、匀光等结构复杂的光学组件。通过光线追迹软件对照明光路的光学特性进行了仿真评估,光能利用率达69.5%,照明均匀性达90.9%,光学体积仅为 $3.06\text{ cm}^3$ ,达到了提高光效和减小体积的设计目的。

**关键词** 光学设计;渐变折射率透镜;仿真;光能利用率;照明均匀性

**中图分类号** TB133;TN214;TN256 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.122201

## Design of Illumination System of Laser Projector using GRIN Lens

Rui Dawei Lin Zulun Qi Kangcheng Liu Yi Li Guodong

(School of Opto-Electronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)

**Abstract** Illumination system is the key factor influencing both the luminous efficiency and the size of the optical engine of a projector. The traditional illumination system aims at the collection and distribution only for Lambert source, failing to radically overcome the disadvantages of low luminous efficiency or big size. A design in illumination system using Gradient-Index (GRIN) lens arrays for single chip digital light processing (DLP) laser projector is introduced. The complex optical components of traditional illumination system are substituted by single-stage lens. Also, the optical performance is simulated and evaluated by the ray tracing software. The results show that the luminous efficiency of the entire illumination system is 69.5%, the uniformity of illumination is 90.9%, and the volume is only  $3.06\text{ cm}^3$ , reaching the goal of improving the luminous efficiency and reducing the size of optical engine.

**Key words** optical design; graded index lens; simulation; luminous efficiency; uniformity of illumination

**OCIS codes** 220.2945; 110.2760; 060.2390; 140.2020

## 1 引言

近年来,投影仪已进入个人消费领域,发展方向是便携化和高效性。投影仪的光学引擎通常包括光源、照明光路、调制系统以及投影镜头。照明光路的功能是实现聚光、匀光与合光,产生准直而均匀的照明光斑。在光源流明效率既定的前提下,照明光路是决定光学引擎光能利用率以及光学体积的主要因素。因此,要提高投影仪的光能利用率,实现微型化,就必须改进光学引擎特别是照明光路的光学结构。

现阶段投影仪光源已由传统的超高压汞灯(UHP)逐渐向发光二极管(LED)过渡<sup>[1]</sup>。对于UHP,其发射光谱除可见光外,还有一定成分的紫外和红外光,需增加滤光片,成本和体积相应增加。特别对于数字光处理(DLP)和硅基液晶(LCoS)结构,需要分光系统将白光分解为三原色,要求设置色轮或分色镜等组件,这也增加了成本和系统尺寸,同时降低了系统色域。光学元件的增加导致损耗增加,最终限制了系统的出光效

收稿日期: 2011-07-20; 收到修改稿日期: 2011-08-17; 网络出版日期: 2011-10-13

基金项目: 四川省应用基础研究基金(2009JY0054)和富通翱翔基金(FTAX201006)资助课题。

作者简介: 芮大为(1983—),男,硕士研究生,主要从事微型投影仪方面的研究。E-mail: davyray@163.com

导师简介: 林祖伦(1950—),男,教授,主要从事电真空技术和新型显示技术方面的研究。E-mail: zllin@uestc.edu.cn

率。三基色 LED 光源色域较好,且不需要分色系统,集成度有所提高,但由于 LED 的朗伯源分布特性,光收集方式始终是制约光效的主要因素。

相对于 LED 而言,激光照明具有潜在的优势。激光具有极高的方向性和单色性。输出功率为 4~20 W、流明效率达 100 lm/W、覆盖可见光全波段的半导体激光二极管(LD)产品已在德国上市<sup>[2]</sup>。选择 LD 作为投影光源的最大优势在于,不需使用结构复杂的聚光和匀光组件,仅需对细光束进行适当的扩展,即可压缩出射光斑的发散角,产生照度均匀的准直光,从而最大限度地减小系统的光学扩展量,使得投影光斑与调制器工作表面之间形成高效的光学耦合。现有照明光路主要是针对余弦分布的朗伯源来设计,光收集的思路需从对朗伯源的聚光转变为对高斯光束的扩束。于是如何合理设计用以实现激光扩束和整形的光学结构,以充分发挥激光方向性和单色性的独特优势,是亟待解决的关键问题。

在光纤通信行业中,常用渐变折射率(GRIN)透镜制作成光纤准直器,对近红外波段的高斯光束进行聚焦或准直。基于 GRIN 原理,本文设计了一种以 GRIN 透镜为核心器件<sup>[3]</sup>的单片式 DLP 投影仪照明光路。使用 GRIN 透镜构成照明光路的必要性在于,实现对 LD 发出的可见光波段高斯光束的扩束、准直、匀光以及光斑整形,使出射的照明光斑质量满足投影要求,直接被数字微镜(DMD)光调制器所利用。照明光路仅由单级透镜系统构成,结构简单,提高了照明光路的光能利用率。

## 2 GRIN 透镜用于照明

### 2.1 GRIN 透镜准直机制

GRIN 透镜也称自聚焦透镜,为实心圆柱镜体。其传光机制不同于光棒和锥形光管,锥形光管是利用光在其内部多次全反射以压缩出射光的发散角度,光棒也是利用内部的多次全反射以形成光源虚像继而实现匀光。而 GRIN 透镜则是利用折射率的梯度分布特性来产生光场均匀的准直光。本文所采用的 GRIN 透镜,其折射率梯度沿径向变化,分布函数满足平方律(抛物线)的一次方形式<sup>[4]</sup>:

$$n(r) = n_0 \left[ 1 - \frac{1}{2}(\alpha r)^2 \right],$$

式中  $\alpha$  是介质折射率渐变系数, $n_0$  是轴心折射率。

光在折射率逐渐降低的薄层中传输时,基于折射原理向中心自动偏转,因此其光迹呈正弦曲线。一个周期正弦曲线的光学长度称为节距  $P$ ,可知  $P = 2\pi/\alpha$ 。当点光源置于长度为  $(2n+1)P/4$  的透镜输入端面的轴上点处时,透镜可出射平行光。由于出射光为平面光波,因此照明面的照度分布均匀。图 1 模拟了  $P/4$  长度的 GRIN 透镜子午光场分布。对于  $P/4$  长度,可见光波段的透射率在抛光后为 89%,镀减反(AR)膜后可达 98%<sup>[5]</sup>。

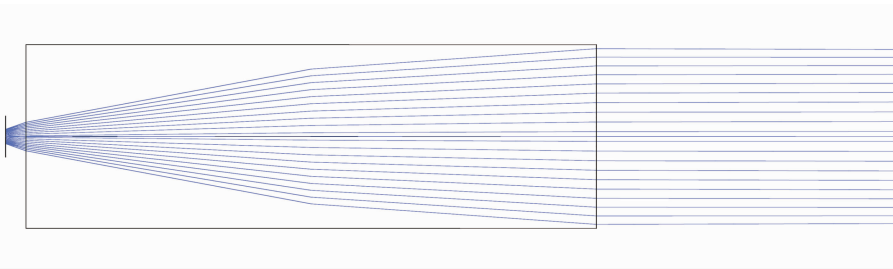


图 1 Zemax 模拟的 GRIN 透镜子午光场分布

Fig. 1 Beam distribution of GRIN lens simulated by Zemax

### 2.2 增大单透镜通光面

为保证光经 GRIN 透镜扩束后的光斑大小接近透镜通光面,要求入射光束的发散角等于透镜的最大入射孔径角  $\theta_{\max}$ 。由中心数值孔径<sup>[4]</sup>  $NA = n_0 \sin \theta_{\max}$ ,可得

$$\theta_{\max} = \arcsin \frac{NA}{n_0} = \arcsin \frac{\alpha r_{\max}}{\sqrt{1 + (\alpha r_{\max})^2}},$$

式中  $r_{\max}$  为透镜半径。取  $\alpha$  典型值 0.339,则全角约为  $30^\circ$ 。而高斯光束的远场发散角尤其是水平发散角很小<sup>[6]</sup>,一般不大于  $10^\circ$ ,无法通过直接扩束使光场充满透镜通光面,这就要求 LD 出射端对高斯光束进行发散

处理以出射圆光锥。一种解决方法是利用望远系统原理<sup>[7]</sup>,先用一个短焦距透镜将高斯光束聚焦,获得极小腰斑及较大的远场发散角,再用自聚焦透镜获得准直。

实现方法如图 2 所示,激光器内部的高斯光束远场发散角  $\theta_0 = \lim_{z \rightarrow \infty} \frac{2\omega(z)}{z} = \frac{2\lambda}{\pi\omega_0}$ ,通过位于激光器输出端的焦距为  $F_1$  的短焦距透镜  $L_1$  后,像高斯光束的发散角  $\theta'_0 = \frac{2\lambda}{\pi\omega'_0}$ 。可见,  $\omega'_0\theta'_0 = \omega_0\theta_0$ 。若  $\omega'_0 < \omega_0$ ,则  $\theta'_0 > \theta_0$ ,由透镜的成像原理可知,当  $F_1 \ll l$  时,  $L_1$  将物高斯光束聚焦于前焦面从而得到一极小光斑  $\omega'_0 = \frac{\lambda F_1}{\pi\omega(l)}$ ,则  $\theta'_0 = \frac{\omega(l)}{F_1}$  为极大值发散角,激光器出射光锥,其中  $\omega(l)$  为入射在  $L_1$  表面上的光斑半径。由于  $\omega'_0$  恰好设置在渐变折射率透镜  $L_2$  的后焦面上,所以光腰为  $\omega'_0$  的高斯光束不仅被  $L_2$  很好地准直,得到很小的照明光束孔径角  $\theta''_0$ ,而且准直后的光场均匀分布于整个透镜通光面内。通过上述扩束方法,只设置单级透镜系统即完成了照明光路的准直与匀光。

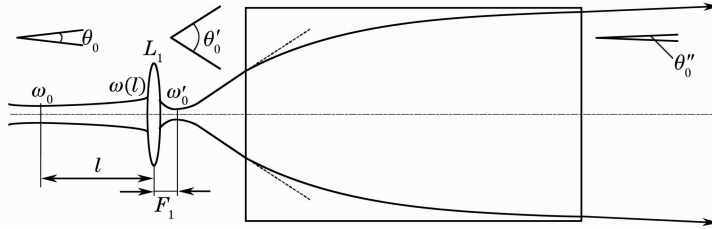


图 2 GRIN 透镜内部光束扩展原理图

Fig. 2 Sketch map of beam expansion inside GRIN lens

### 3 照明光路实施方案

#### 3.1 GRIN 透镜阵列

在现有的 GRIN 透镜制造工艺下,透镜规格多为 1 或 1.8 mm,一般不超过 3 mm。因此扩束能力受限于透镜截面面积。对于调制面 0.3 inch(1 inch=2.54 cm)的 DMD,显然单透镜的准直光不足以提供整个 DMD 工作表面 6.75 mm 的照明光斑。如果透镜出射光锥,虽可覆盖 DMD,但较大的锥角势必会影响有效投影面积和光斑均匀性。通常 DMD 要求接收照明光具有良好的准直性以便生成近准直的调制光传递给投影镜头,因此,发散的照明光束孔径角不利于投影透镜的完善成像。为压缩发散角而增加 GRIN 透镜与 DMD 之间的光程会增加系统的体积,增设透镜则会降低系统透射率。并且圆光斑对矩形 DMD 的光能利用率仅有 61.1%。可见,GRIN 透镜的投影角度与有效照明面积互相矛盾。

为解决上述矛盾,产生可与 DMD 光学表面相耦合的矩形光斑,将光源和 GRIN 透镜均阵列化,即采用准直透镜阵列对阵列化的高斯光束进行一对一的耦合,在保证单透镜出射光准直性的基础上增加照明面积。

#### 3.2 照明光路结构

与以 LED 为代表的朗伯光源相匹配的传统照明光路,主要包括用于聚光的反光碗、透镜、锥形光管,用于匀光的方棒、复眼透镜以及用于合光的 X 棱镜、二向色镜等。反光碗、聚光透镜等光学器件决定光提取效率,方棒和复眼透镜系统在照明光路中主要起光斑整形和匀光的作用。由于方棒入射端要求入射光具有小发散角,出射端又需额外引入照明透镜组以加强均匀性,因此整体尺寸较大。对于复眼系统,其前级必须由抛物型反光碗等聚光组件对光源进行聚光,也不利于集成。经匀光系统进行重叠照明和光斑整形,其出射光斑的匀光性和形状仍难以精确控制,对于单片式光调制器光学引擎,经聚光、匀光及合光后,最终到达调制系统的光能也仅剩 30%~50%。

如图 3 所示,光学引擎包括:红绿蓝(RGB)激光光源、单级 GRIN 透镜阵列、二向色镜、反射镜、DMD、吸收器和投影镜头。照明光路由三组透镜阵列及其所对应的三组二向色镜组成。

光源采用 RGB 三组单色 LD,其驱动方式<sup>[8]</sup>对应于单片式 DMD,采用时间混色法。RGB 波长分别为 650,555,480 nm,单色 LD 平均输出光功率 1 W。

透镜矩阵由几何参数、光学特性和加工精度均相同的渐变折射率透镜紧密排列而成,排列原则是满足较高的填充系数,使有效通光面密集排列。

LD 与透镜阵列的光学连接,必须保证一个激光输出端对应一个 GRIN 透镜单元,并且各激光束能量相同,光学特性一致。LD 的每个光束输出端都有如图 2 所示的短焦距透镜向 GRIN 透镜提供发散光锥。对于单输出端的 LD,可采用光纤耦合器将总光束按功率等分,再通过光纤准直器阵列分别耦合到透镜阵列的每个透镜单元。对于阵列输出的 LD,可采用光纤耦合或空间耦合的方式,与 GRIN 透镜阵列单元进行一对一光学耦合<sup>[9]</sup>。同时,考虑到同一光束分割出的子光束之间在照明端的透镜交界处可能产生明显的干涉条纹,由于光束的近准直特性,非相邻透镜间不会有光斑重叠,因此对相邻透镜采用不同输入来源的子光束进行模拟仿真。

照明光路的实现方式是,三基色激光器分别经三个透镜阵列产生三个单色照明光斑,三组二向色镜分别接收三组透镜阵列出射的光斑,进行选择透反射,完成空间范围内的合光并将重合的照明光斑传递给反光镜,继而投射到 DMD 上。经 DMD 阵列的调制,图像信息反射至投影镜头,非图像信息则反射至光吸收器。

该照明光路也可应用于单片式 LCoS 以及三片式 DMD、LCoS 和液晶显示器(LCD)光学引擎。三片式相对于单片式的变化在于,三基色光源分别经 GRIN 透镜阵列匀光后,先由空间光调制器组件调制成单色图像信息,再由合光器件将三组单色图像信息合光并投影到镜头。

## 4 基于 GRIN 透镜阵列的照明光路仿真

综合考虑 GRIN 阵列的光能利用率、照明均匀性以及投影光斑形状,模拟了单位透镜通光面分别为正方形和圆形的两种方案进行仿真对比。照明光路的光学扩展量<sup>[10]</sup>由  $E = \pi S(NA)^2$  确定,其中  $S$  是透镜阵列发射面的总面积, $NA$  为单透镜照明光束的数值孔径。由于照明光束的孔径角很小,所以光学扩展量满足在系统传递过程中的守恒。采用 TracePro 软件进行了照明光路的建模与光线追迹,评估了照明光路的各项光学性能,对其光学体积也进行了计算。

### 4.1 通光面为正方形的矩形阵列

如图 4(a)所示,为实现矩形光斑,本文模拟的 GRIN 透镜规格如下:透镜焦距( $P/4$ )为 4.22 mm;每个透镜单元被切割成通光面为 1.4 mm×1.4 mm 的正方形、长为 4.19 mm 的正四棱柱;透镜长度略小于  $P/4$ ,以预留与 LD 输出端之间的后工作距离。矩形阵列的填充系数(有效传光面积和总截面面积之比)较高。透镜单元之间以侧面紧密接触固定,排列成 4×3 矩阵,以确保照明面上的矩形光斑恰好与 DMD 阵列面相吻合。考虑到透镜接触面之间由于装配方式和加工精度等因素会有一定缝隙,在建模时引入了一定的间隔。两个透光面镀增透膜,侧面为光吸收层。由于单透镜的折射率分布依然是圆形,正方形通光面的折射率梯度并非

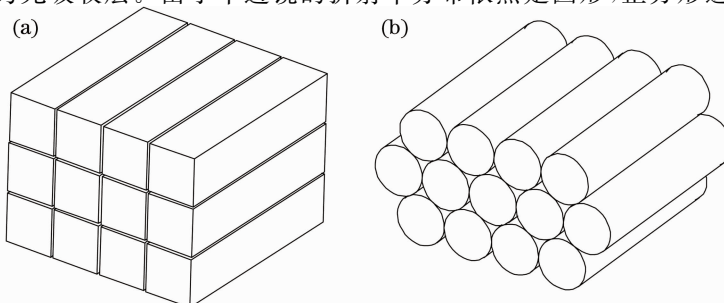


图 4 GRIN 透镜阵列的两种方案。(a)矩形阵列,(b)密堆阵列

Fig. 4 Two types of architecture of GRIN lens array. (a) Array of right square prism; (b) array of column

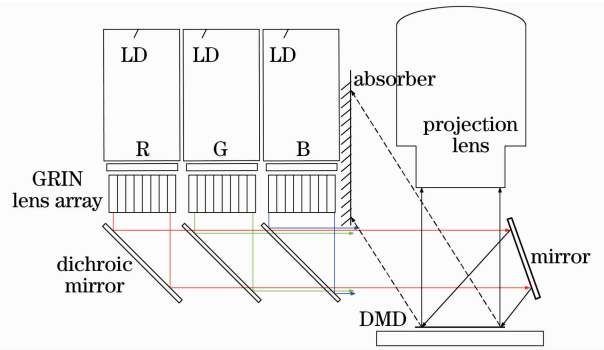


图 3 基于 GRIN 透镜阵列的单片式 DLP 激光投影机光学引擎示意图

Fig. 3 Sketch map of single DLP laser projector using GRIN lens arrays

旋转对称,从而降低了边缘光线的均匀性。精确调整透镜的光学长度及后工作距离,使出射光具有微小的发散锥角,继而相邻单透镜出射的边缘光线之间在照明面上实现一定程度的重叠照明,还原均匀性。

图 5 为矩形阵列照明光路仿真图,表示了光程最远的红色激光经 GRIN 透镜阵列、三组二向色镜以及反射镜后到达 DMD 的光路。经三基色分别进行光线追迹,验证了 DMD 表面照明光斑的均匀性及几何尺寸等均无显著变化。仿真中,每个单位透镜所对应的模拟光源均采用相同设置,均为发散型高斯光束,且光斑能量均匀分布,从而保证在透镜传输过程中的匀光性。从图 6 所示的 DMD 表面照度分布可以看出,光斑为 4:3 的严格矩形且能量分布较为均匀,光斑完全覆盖 0.3 inch DMD 所限定的  $5.4 \text{ mm} \times 4.05 \text{ mm}$  的区域,且这一区域内的照度均匀性达到 90.9% 以上。照明面投影效率(即 DMD 阵列面的表面与照明光斑总面积的比例)为 84.2%。将 GRIN 阵列的准直匀光、二向色镜的光路选择、反射镜的全反射以及在 DMD 工作面上的有效投影等各环节仿真所得到的光能利用率相乘,得出照明光路对光源的综合利用率为 68.4%。

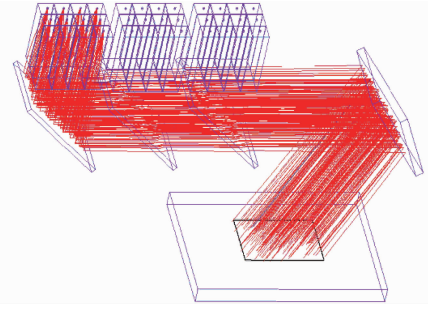


图 5 GRIN 阵列照明光路光线追迹图  
Fig. 5 Ray tracing of GRIN lens array illumination system

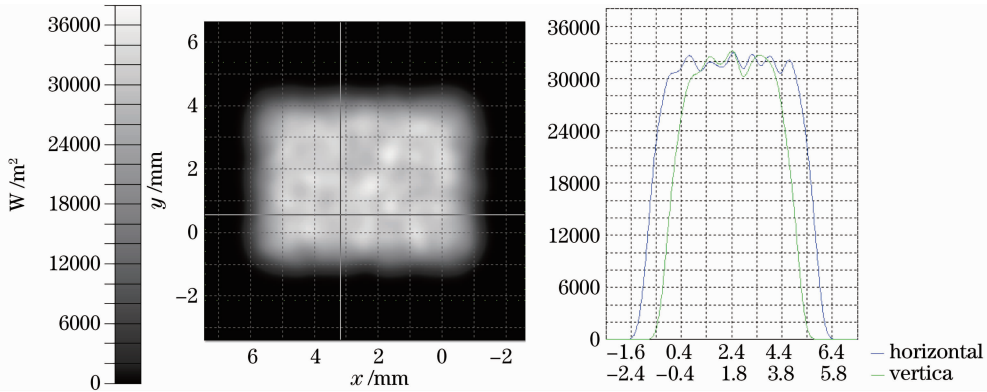


图 6 矩形阵列照度图与配光曲线

Fig. 6 Irradiation map and light distribution of right square prism arrays

## 4.2 通光面为圆形的密堆阵列

为了克服切割透镜所造成的边缘光线的浪费,对阵列结构加以改进:采用未切割的圆柱透镜以六角形排列方式密集堆积,如图 4(b)所示,13 枚规格为 1.8 mm 的圆柱透镜紧密接触固定,其使内部折射光线无吸收地全部出射,从而最大限度地提高光效,同时也降低了工艺难度和生产成本。

图 7 为圆柱密堆阵列的照度分布图与配光曲线。照度均匀性为 88.9%。虽然照明光斑不是严格矩形,使照明面的投影效率稍有降低,但是由于对边缘光线的全部利用,照明光路的总光效达到 69.5%,高于矩形阵列。两种阵列方案的参数统计如表 1 所示。

表 1 基于 GRIN 透镜阵列的照明光路光学性能统计

Table 1 Optical performance of illumination system using GRIN lens array

Architecture of arrays	Right square prism	Column
Efficiency of GRIN arrays /%	84.5	98
Aperture angle of luminous beam /( $^{\circ}$ )	0.68	0.69
Efficiency of dichroic mirrors /%	96.2	96.2
Etendue /( $\text{sr} \cdot \text{mm}^2$ )	0.027	0.037
Uniformity of illumination /%	90.9	88.9
Efficiency of projection /%	84.2	73.7
Total efficiency of illumination system /%	68.4	69.5

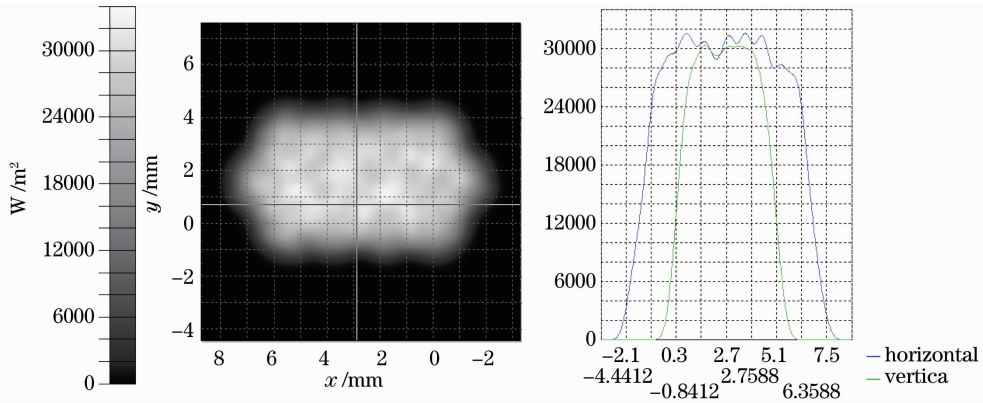


图7 密堆阵列照度图与配光曲线

Fig.7 Irradiation map and light distribution of column arrays

## 5 结 论

本文所设计的基于 GRIN 透镜阵列的 LD 照明光路,在严格考虑材料损耗与装配误差等因素的基础上仿真所得到的光提取效率接近 70%,优于传统 LED 照明光路的 30%~50%;照明光路总体积仅为 3.06 cm<sup>3</sup>,优于现有 LED 微型投影仪照明光路的光学体积<sup>[11]</sup>。而照明均匀性也达 90.9%,与其他设计水平相当。GRIN 透镜阵列不仅提高了照明光路的光能利用率,而且实现了照明均匀性,限制了光学扩展量,同时极大地简化了照明光路及光学引擎的结构。但是,激光干涉条纹和散斑对图像质量的影响尚需克服<sup>[12]</sup>,实物验证也正在进行中。对于在图像质量要求不高但在便携性和续航时间方面有特殊要求的场合,如地图显示等,激光微型投影仪尚有待开发。可以预见,基于 GRIN 透镜的激光照明将成为投影仪尤其是微型投影仪的一个极具潜力的发展方向。

## 参 考 文 献

- 1 H. Murat, H. D. Smet, D. Cuypers *et al.*. Increased lumens per etendue by combining pulsed LEDs[C]. *SPIE*, 2005, **5740**: 1~12
- 2 DILAS. DILAS PR0935 Visible Single Bar[EB/OL]. <http://www.DILAS.com>
- 3 Shou Xiang, Gan Benxin, Su Hongyan. Thin lens equivalent system for selfoc lens and its application[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(11): 111801  
寿翔,甘本鑫,苏红艳.自聚焦透镜的单薄透镜等效系统的应用[J].*激光与光电子学进展*, 2010, **47**(11): 111801
- 4 Chi Zeying, Chen Wenjian. Applied Optics and Elements of Optical Design[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2008. 402~406  
迟泽英,陈文建.应用光学与光学设计基础[M].南京:东南大学出版社,2008. 402~406
- 5 TOWIN. GRIN Lens Products Catalog V3.0[EB/OL]. <http://www.towingroup.com.cn>
- 6 R. G. Wilson. Ball-lens coupling efficiency for laser-diode to single mode fiber: comparison of independent studies by distinct methods[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(15): 3201~3205
- 7 Zhou Bingkun, Gao Yizhi. Principle of Laser[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009. 79~83  
周炳琨,高以智.激光原理[M].北京:国防工业出版社,2009. 79~83
- 8 Wei Wei, Chen Weimin, Wang Ning *et al.*. Analysis and experiments on multi-color projection scheme based on grating light modulator[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(5): 052301  
韦玮,陈伟民,王宁等.基于光栅光调制器的彩色投影方案分析与实验[J].*激光与光电子学进展*, 2010, **47**(5): 052301
- 9 Zhang Bingyuan, Wang Guoju, He Jingliang *et al.*. Passively mode locking of Nd:YVO<sub>4</sub> laser with GRIN lens as optical coupler[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0714001  
张丙元,王国菊,何京良等.自聚焦透镜耦合激光二极管抽运 Nd:YVO<sub>4</sub>锁模激光器的研究[J].*光学学报*, 2011, **31**(7): 0714001
- 10 G. Harbers, S. Paolini, M. Keuper. Performance of high-power LED illuminators in projection display[J]. *J. Display*

Technol. , 2007, **3**(2): 100~105

- 11 Jui-wen Pan, Sheng-han Tu. High efficiency pocket-size projector with a compact projection lens and a light emitting diode-based light source system[J]. *Appl. Opt.* , 2008, **47**(19): 3406~3414
  - 12 Sun Mingjie, Lu Zukang. Study of speckle suppression by a moving diffuser in liquid crystal on silicon based laser projection system[J]. *Chinese J. Lasers* , 2010, **37**(3): 718~721
- 孙鸣捷, 陆祖康. 硅基液晶激光投影中散射体散斑抑制作用的研究[J]. *中国激光* , 2010, **37**(3): 718~721