

Optical Design for LED Micro Projector Source Based on Multiple Spherical Surfaces Lens^{*}

RUI Dawei ,QI Kangcheng^{*} LIN Zulun ,CHEN Wenbin ,LIU Yi ,LI Guodong

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

Abstract: The Improvement of light extraction efficiency of LED light source is the key and precondition in improving the lighting efficiency of micro projector. The max factor in restricting the light extraction rate of LED is the configuration of light source. A novel optical design of LED's encapsulation lens with multiple spherical surfaces is introduced and simulated. By using this single stage lens for both encapsulation and optical distribution ,the light extraction efficiency of this new designed LED light source is improved to 94.9% ,and the beam angle and the étendue are both excellently condensed. Also ,the configuration of light source system is simplified as well.

Key words: micro projector; light extraction efficiency; multiple spherical surfaces; beam angle; étendue; simulation
EEACC: 4260D; 7210 **doi:** 10.3969/j.issn.1005-9490.2012.01.010

基于多球面封装透镜的 LED 微型投影仪的光源设计^{*}

芮大为 ,祁康成^{*} 林祖伦 ,陈文彬 ,刘 旂 ,李国栋

(电子科技大学光电信息学院显示科学与技术重点实验室 ,成都 610054)

摘 要: 提高光能利用率是现阶段 LED 微型投影仪的技术难题 ,而提高光源的取光效率则是提高整机光效的前提和根本途径。对于以 LED 为代表的朗伯源 ,其光学元件的结构是制约光能利用率的极大因素。我们提出了一种基于多球面单透镜的 LED 光源设计方案并进行了光学仿真 ,将 LED 的一次封装和二次光学设计整合为一体 ,简化了光源系统结构 ,取光效率提高到 94.9% ,同时压缩了出光角度和光学扩展量。

关键词: 微型投影仪; 取光效率; 组合球面; 发散角; 光学扩展量; 仿真

中图分类号: TB133; TN214

文献标识码: A

文章编号: 1005-9490(2012)01-0039-04

近年来 ,随着微型投影仪制造工艺的不断进步 ,提高其光能利用率成为重要的技术突破点。采用 LED 的微型投影仪光源 ,通常由反光碗、聚光透镜及准直透镜组合而成^[1-3]。由于结构复杂 ,光学表面的损耗难以控制 ,使得光源对 LED 芯片的收集效率一般不超过 70%^[4-7]。同时 ,由于对边缘光线的聚集能力不足 ,出射光束的发散角难以被压缩 ,光学扩展量较大。近年来兴起的自由曲面透镜虽然在理论上能较好地提高收集效率、准直特性以及照明均匀性 ,但是对于微投影光源这类微光学加工器件 ,尚不具备成本和技术上的优势。于是如何设计 LED 封装透镜的光学结构以寻求器件体积、加工难度和收集效率三者之间的平衡 ,是目前亟待解决的关键问题。因此 ,综合考虑 LED 的朗伯分布特性^[8]、加

工精度以及光学引擎对体积的苛刻要求 ,本文设计了由若干组规则球面组合而成的封装透镜 ,将 LED 裸芯片的朗伯分布光线 ,按其发散角度划分后进行剪裁式收集 ,同时将 LED 一次封装和二次光学设计进行了整合 ,极大地提高了光能收集效率 ,简化了光源系统结构。

1 基于多球面封装透镜的光源设计

1.1 微型投影机对 LED 光源的总体^[7]要求及应对策略

(1) 光收集效率 光源的收集效率是光源出射光功率与芯片辐射光功率的比值 ,表征光学组件对芯片的收集能力 ,是光学引擎乃至整机最重要的设计指标。实现光收集效率最大化是本设计的基本原则。

项目来源:四川省应用基础研究基金项目(2009JY0054)

收稿日期:2011-08-12 修改日期:2011-08-24

(2) 出光发散角 光源的发散角指透镜出射端到后级光学系统之间近场范围内的发散角度。由于光源到匀光器件之间有一定的工作距离,为保证后级系统的有效照明,要求近场发散角尽可能小,光束近准直状态,且光线之间的角度一致性尽量地高。然而当 LED 芯片相对于小尺寸透镜应视为面光源,受光学加工精度的制约,光源出射光线间角度一致性不易控制,因此如何平衡近场照明距离与光线出射角度之间的关系是本设计的难点。

(3) 光学扩展量^[10] 作为光束几何尺寸和空间存在方式的度量,光学扩展量在整个光学引擎传递过程中,满足保持不变或略有增加这一规律,且要求光源的光学扩展量不能大于系统的光学扩展量。因此光源的一个设计原则就是在保证光效的前提下尽可能压缩光学扩展量。面光源光学扩展量应满足下式

$$E_{\text{光源}} = \pi \cdot S_{\text{光源}} \cdot (NA)^2 = \pi \cdot S_{\text{光源}} \cdot n^2 \cdot \sin^2 \theta_{1/2} \quad (1)$$

其中 $S_{\text{光源}}$ 为光源的有效发光面积, NA 为光源出射光束的数值孔径, n 为光传播介质折射率, $\theta_{1/2}$ 是光源出射光束的发射半角。

(4) 体积 受微投影仪整机体积的限制,光源横截面最大处直径不超过 10 mm,这同时给提高收集效率和压缩出射角度提出了更严格的要求。

(5) 可加工性与成本 综合考虑光学指标以及光学精加工的难度,使得自由曲面、非球面等复杂的面型结构难以应用于实际加工。为保证取光效率等光学性能,采取球面组合的方式设计裸芯片的光学封装透镜,进而实现低成本的可加工性。

1.2 光源设计方案

三基色 LED 各使用一个单透镜,通过两组二向色镜实现空间范围内的合光。LED 驱动方式采用时间混色法,将三基色 LED 总驱动时间划分为各单色光的驱动时间之和,即利用人眼的视觉暂留特性,通过控制驱动脉宽来实现全彩混色。各单色 LED 的驱动功率依据色匹配原则^[8,11]及芯片的流明效率加以确定。三基色的模拟波长分别为 650 nm, 530 nm, 480 nm。单色光源由带基座的 LED 芯片和多球面封装透镜组成。LED 芯片为 1 mm×1 mm 的前表面发光的面光源,光场的分布角为 180°。芯片与透镜之间的空间以硅胶填充,从而实现对电极和引线的封装固定。

透镜的光提取与分配的总体思路是,将 LED 近 180°分布的光场剪裁为两部分:即中心的小角度发散光锥与边缘的大角度光线。二者在透镜内分别经不同光路转换为近准直光线,并且在透镜的出射端合为一路,在确保二者交界处光线的均匀过渡的基

础上提高光收集效率。照明光斑的均匀性由后级的匀光系统保证^[12]。

取透镜子午面位于第一象限的部分进行具体分析,如图 1 所示。透镜的光学表面由 $S_1 \sim S_5$ 组成,其中 S_1 、 S_2 和 S_5 为球面, S_3 为抛物面, S_4 为平面。 S_2 的球心、 S_3 的焦点和 LED 芯片发光面中心三者重合,且与 S_1 和 S_5 的球心共线于主光轴。将 90°的分布半角分割为小角度光锥 α 和大角度光线 β , α 角内的光线先后经 S_1 和 S_2 的折射转化为近准直光线; β 角内的光线经 S_2 的垂直透射、 S_3 的全反射及 S_4 的折射也转化为近准直光线,并与前者合为一束。

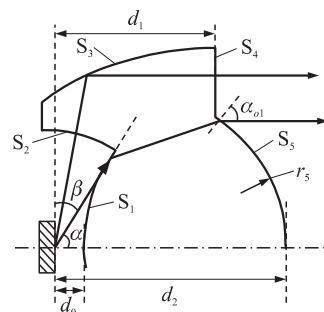


图 1 多球面透镜结构与光路示意图

为了最大限度提高光收集效率,在光学面的数量既定的前提下,需要减小反射及透镜内的光程以降低传播损耗。各光学表面的设计均在这一原则的指导下进行。首先 S_2 为以芯片发光中心为球心的球面,可以使得 β 范围内的光线近乎垂直入射到透镜内部,减小反射损耗。其次 S_3 外表面镀以全反射光学薄膜,将位于抛物面焦点处的入射光较高效地反射为近平行光线。对于透镜的边缘厚度 d_1 和中心厚度 d_2 ,也尽量减小以降低传播损耗。 S_1 和 S_2 的曲率半径 r_1 和 r_2 由透镜材料折射率、 α 和 β 值以及出射光线的准直性加以确定,其方法是,以 α 和 β 角的分界线作为极限光线进行分析,同时结合透镜厚度以及对出射的两路光线在合成界面均匀过渡的要求。利用斯涅尔定律和平面解析几何的相关原理,经迭代得到透镜边缘与中心厚度的基本表达式为:

$$d_1 = r_5 \sin \alpha_{01} \frac{1 + \sqrt{1 - \tan^2 \alpha}}{\tan^2 \alpha} \quad (2)$$

$$d_2 = d_1 + (r_5 - r_5 \cos \alpha_{01}) - d_0 \quad (3)$$

其中 α_{01} 是以角入射的边缘光线在 S_4 和 S_5 的交界处的出射光线相对于 S_5 的折射角, r_5 是 S_5 的曲率半径, d_0 是芯片中心与 S_1 的距离。面型的确定采用工程近似原则,由 LED 面光源的两条边缘光线及经过几何中心的光线三者分别求解后进行加权而得以确定。经反复优化,得到了取光效率与发散角等光学参数之间的平衡。

2 模拟仿真与性能参数

采用 TracePro 软件进行三维实体建模和光线追迹。图 2 是单色 LED 多球面封装透镜的三维框架图, 经优化所得的多球面组合的 LED 封装透镜最大外径为 9.4 mm, 满足微型投影仪光学引擎的体积要求。图 3 是基于三基色 LED 光源的照明光路模型。照明光路的实现方式是, RGB 三色 LED 分别经各自的封装透镜, 出射近准直的照明光束。两组与水平面成 $\pm 45^\circ$ 角二向色镜对入射的三基色照明光束分别进行如下调制: 对左侧入射的红光给予完全透射; 上方入射的绿光经 -45° 二向色镜全反射后由 $+45^\circ$ 二向色镜透射; 对下方入射的蓝光给予全反射, 最终在 $+45^\circ$ 二向色镜的出射面将三基色照明光斑合为一束, 完成空间范围内的混色, 从而传递给前后两级复眼透镜进行匀光与光斑整形(整形为矩形)。

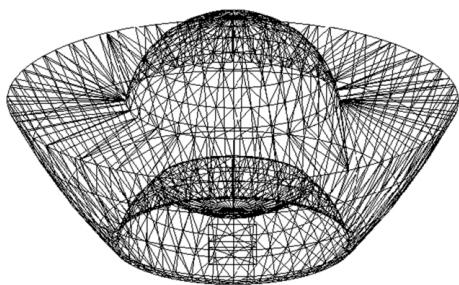


图 2 多球面透镜三维框架图

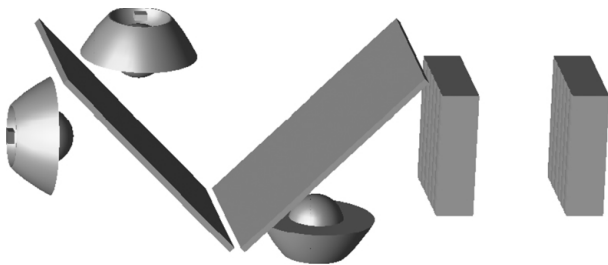


图 3 三基色光源的排布及照明光路

经软件光线追迹, 加以辅助计算得到了 LED 光源的各项性能参数, 如表 1 所示。

表 1 LED 光源光学特性

LED 色光	红	绿	蓝
光源取光效率 / %	94.9	94.3	92.7
照明光束发散角 / ($^\circ$)	≤ 4		
光学扩展量 / ($\text{sr} \cdot \text{mm}^{-2}$)	≤ 14.5		
二向色镜光利用率 / %	96.2	97.6	100
照度均匀性 / %	≥ 88.7		
有效照明效率 / %	93.6	93.6	98.5
光源总照明光效 / %	85.5	86.1	91.3

单色光的光收集效率均达到 94.9%; 在红、绿光源出射端与前复眼透镜前表面 33 mm 的工作距离之间, 光源出射光束的发散角小于 4° , 且光线之间的角度一致性在 $\pm 9^\circ$ 内; 相应地, 光源的光学扩展量小于 14.5 sr/mm^2 ; 照射至前复眼透镜的单色光最高光效为 91.3%。结合图 4 所示的前复眼透镜的入射面所接收到的光源照明光斑的照度图以及图 5 所示的直角坐标配光曲线进行分析, 可知, 三基色的合成光源在前复眼透镜的前表面产生的照明光斑, 其有效照明面积集中在直径 13 mm 的圆形区域内, 其照明均匀性达 88.7%, 极大地减轻了复眼透镜的匀光压力。

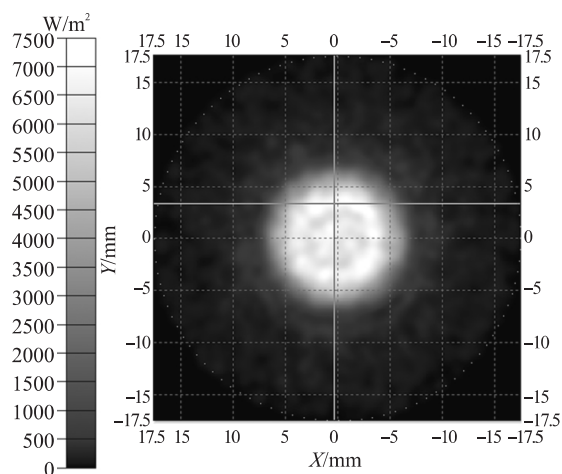


图 4 前复眼入射面的照明光斑照度图

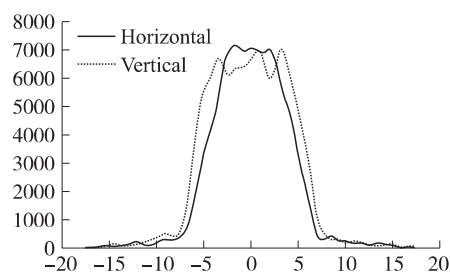


图 5 照明光斑配光曲线

3 结论

本光学设计完成了对微型投影仪 LED 光源的多球面单透镜的三维建模、光路模拟以及光学性能分析。虽未采用现今流行的自由曲面等设计方法进行偏微分求解, 但采用基本光学定律及工程近似方法在设计上取得了光学性能与可加工性之间的平衡。以组合球面的单透镜实现了对朗伯源的收集与分配, 取光效率达 94.9%, 相对于传统聚光方式有了较大提高, 并且压缩了光源的光学扩展量, 降低了透镜的光学加工难度。将 LED 光源的一次封装与二次光学设计整合为一体, 简化了光源结构, 同时也

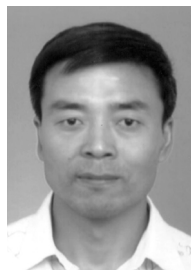
进一步有助于光效的提升。可见,在倡导绿色节能的今天,随着光源取光效率与整机光效的提升,微型投影仪将具备更持久的续航时间以及更蓬勃的生命力。

参考文献:

- [1] Murat H, Cuypers D, DE Smet H. Design of New Collection Systems for Multi LED Light Engines [C]//SPIE, 2006, 6196: 619604.1-619604.11.
- [2] 闫峰, 孙文军, 王淑英, 等. LED 照明光场照度均匀性的研究[J]. 光学技术, 2007, 33(suppl): 327-328.
- [3] Pan Jui-Wen, Tu Sheng-Han. High Efficiency Pocket-Size Projector with a Compact Projection Lens and a Light Emitting Diode-Based Light Source System[J]. Applied Optics, 2008, 47(19): 3406-3414.
- [4] 邱崧, 王蔚生, 王淑仙, 等. 基于 LED 光源的 DLP 光学引擎的光学设计[J]. 电子器件, 2008, 31(6): 1712-1719.
- [5] 甄艳坤, 李岩, 白燕. TIR 透镜优化设计在 LED 微投影显示系统中的应用[J]. 应用光学, 2009, 30(3): 366-371.
- [6] Harbers G, Paolini S, Keuper M. Performance of High-Power LED Illuminators in Projection Display [J]. Display Technol, 2007, 3(2): 100-105.
- [7] 赵星, 方志良, 崔继承. 微型投影机光学引擎的研究[J]. 光学学报, 2007, 27(5): 913-918.
- [8] 金伟其, 胡威捷. 辐射度光度与色度及其测量[M]: 第一版. 北京: 北京理工大学出版社, 2006: 6-30, 112-158.
- [9] 王蔚生, 姜维, 窦晓鸣. 用于投影机的发光二极管照明单元[J]. 光学学报, 2005, 25(6): 855-859.
- [10] Murat H, Smet H D, Cuypers D et al. Increased Lumens Per Etendue by Combining Pulsed LED's [C]//SPIE, 2005, 5740: 1-12.
- [11] 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: 260-297.
- [12] 杨毅, 钱可元, 罗毅. 一种基于非成像光学的 LED 均匀照明系统[J]. 光学技术, 2007, 33(1): 110-115.



芮大为(1983-) 男, 硕士研究生, 主要从事光学工程专业微型投影仪的研究, davyray@163.com;



祁康成(1969-) 男, 博士、副教授、硕士研究生导师。长期从事电子信息显示技术、阴极材料、光电探测与成像等研究, kcqi@uestc.edu.cn。