

基于全反射的发光二极管-照明光纤耦合器的设计与研制

王子仪¹ 张荣君¹ 徐 蔚² 徐子杰¹ 张 帆¹ 俞 翔¹ 王松有¹ 郑玉祥¹ 陈良尧¹

(¹ 复旦大学信息科学与工程学院上海超精密光学制造工程技术研究中心, 上海 200433)
(² 复旦大学信息科学与工程学院先进照明技术教育部工程研究中心, 上海 200433)

摘要 光纤照明由于具有成本低、安全性高、便携性好和装饰性强等优势, 已经逐渐进入了人们的视野。然而, 现阶段的光源[特别是发光二极管(LED)]由于辐射发散角大, 与照明光纤的耦合效率普遍较低。为了解决这个问题, 根据全反射原理, 设计并制作了一种 LED-照明光纤耦合器。经过实验验证, 该耦合器具有聚光性强、耦合效率高、体积小、制备简便和成本低等优点, 是一种能够有效提升 LED-光纤耦合效率的方式。

关键词 几何光学; 发光二极管; 照明光纤; 耦合器; 全反射; 自由曲面

中图分类号 O439; O435.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0922007

A Light Emitting Diode-Lighting Fiber Coupler Based on Total Reflection

Wang Ziyi¹ Zhang Rongjun¹ Xu Wei² Xu Zijie¹ Zhang Fan¹ Yu Xiang¹
Wang Songyou¹ Zheng Yuxiang¹ Chen Liangyao¹

¹ Shanghai Ultra-Precision Optical Manufacturing Engineering Center,
School of Information Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China
² Engineering Research Center of Advanced Lighting Technology, Ministry of Education,
School of Information Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China

Abstract Fiber-lighting attracts widespread attention because of its advantages of low cost, high safety, good portability and easy decoration. However, the problem of low flux efficiency of coupler products is still difficult to be solved because of the big divergence angle of light sources. In order to improve the efficiency, a coupler based on total reflection theory is designed and fabricated. And according to the results of experiment, the coupler has strong light focusing ability, high coupling efficiency and reduced size. It is a good way to increase the efficiency of light emitting diode (LED)-fiber coupling.

Key words geometrical optics; light emitting diode; lighting fiber; coupler; total reflection; free-form surface

OCIS codes 080.4225; 080.4298; 080.2740; 080.3620

1 引 言

光纤照明是近些年发展起来的一门新型照明技术。它利用光纤不同折射率介质的界面会产生的全反射现象, 通过光纤以一种损耗非常小的方式将光传送到需要光照的任何地方^[1]。光纤照明实现了全光传输, 将照明部分与光源部分完全分离开来, 不仅使安全性能提高, 而且使应用领域大大拓宽^[2], 如工业内窥镜、地下矿坑照明、室内外水下照明和装饰性照明等。

在需要减少光污染、呼唤节能型照明的今天, 结合发光二极管(LED)照明光纤的应用前景广阔。虽然大功率 LED 已经能够满足光纤照明对光源的需求, 但是目前 LED 光纤照明系统的效率依然不高, 通常只能达到 20% 左右^[3]。通过提升耦合效率, 能够大幅提升现有 LED 光纤照明系统的性能, 而改进 LED 光源与照明光纤的耦合方式是提升耦合效率的最有效途径。目前 LED 与光纤耦合中比较有

收稿日期: 2012-02-16; **收到修改稿日期**: 2012-05-16

基金项目: 国家自然科学基金(11174058, 60938004)和 02 国家科技重大专项(2011ZX02109-004)资助课题。

作者简介: 王子仪(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事信息功能材料的光学性质和光学仪器系统方面的研究。

E-mail: fdwzy@foxmail.com

导师简介: 张荣君(1972—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事信息功能材料的光学性质、光学仪器系统与光子学器件等方面的研究。E-mail: rjzhang@fudan.edu.cn(通信联系人)

代表性的是采用直接耦合或者透镜耦合等^[4]。直接耦合无需特别设计,成本低廉,但耦合效率较低;透镜耦合则通过对光源进行聚焦,达到使更多的光线进入光纤的目的。透镜耦合往往采用多个球面或非球面透镜进行组合,以达到较好的配光效果,对配件之间的精密度要求较高,而且透镜耦合体积较大,在组装和运送时容易引起位移导致损耗上升。同时由于端面反射损耗^[4]的影响,透镜数量越多,损耗越大。因此,传统透镜组的设计方法不能够很好地满足 LED-光纤耦合器的要求,而在实际应用中,由于实际出射光功率提升不明显^[8],所以目前大部分光源产品都采用直接耦合的方法。近年来,以自由曲面设计为原理的光学设计方法受到了比较广泛的关注,并取得了一定的成果,从模型设计到模拟方面都留下了一套比较成熟的方案,但前人工作多集中于 LED 直接照明方面的研究^[5~8],LED 与照明光纤耦合方面的研究与实验却鲜见报道。

本文根据全反射原理讨论 LED 与照明光纤耦合的问题,同时借鉴了自由曲面透镜设计方法^[9,10],将复杂的透镜组设计简化为单一非球面设计,降低了耦合器自身的损耗,同时极大地提升了耦合器效率以及聚光能力。在实际组装时,由于没有传统多透镜耦合器装配中的离轴问题,装配难度也有所降低。

2 理论设计与研制

LED-光纤耦合器要求光线进入光纤后能够满足全反射条件,即要求将入射光角度限制在光纤数值孔径的范围内,最佳方法是使耦合器出射光以平行光形式沿光纤轴向入射。为了达到这个要求,采用基于全反射原理的非成像光学自由曲面透镜设计方法,首先对耦合器进行设计。

如图 1 所示,全反射耦合器与光源和光纤直接连接,光线通过耦合器后以接近平行光束的状态进入光纤。这种方法的优点是在保持低耦合损耗的同时,能够将比较复杂的透镜组简化为单透镜,减小端

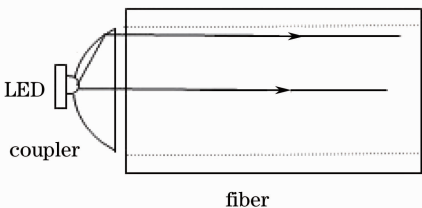


图 1 LED-光纤耦合器系统模型

Fig. 1 Model of the LED-fiber coupler system

面反射损耗。

由于 LED 的旋转对称性^[6],全反射耦合器透镜的设计可简化为二维模型,如图 2 中阴影部分所示,沿 OA 轴向旋转 360° 即可得到耦合器的三维模型。其中 AB 段为光线经过耦合器后的出射面,与光纤端面平行; BC 段为全反射面; DE 段将光线聚焦。为设计方便, CD 段与光纤端面垂直。LED 设想成理想光源,光心位于 O 点。 OC 长度为 LED 半径, AB 长度为光纤内芯半径。光线从 LED 发出后,或者经 BC 面全反射后出射,或者经过 DE 面折射后出射,成为平行光或者接近平行光;从 AB 面出射后进入光纤。综上所述,全反射耦合器的设计可以简化为对 BC 段以及 DE 段曲线的求解。

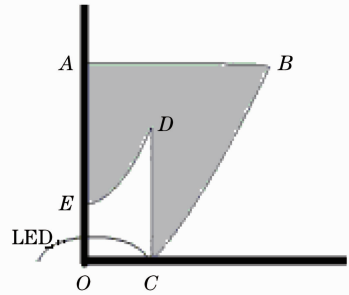


图 2 耦合器的设计示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the design of the coupler

DE 段曲线设计类似于凸透镜,可以利用 Zemax 等专业光学软件进行设计。经模拟发现,本文的耦合器中, DE 段曲线形状对聚光效能的影响不大。因此,研究重点在 BC 段曲线,而 BC 段自由曲面的设计可以采用数学迭代或微分方程法完成^[11],下面以数学迭代法进行简单说明。

如图 3 所示,设介质折射率为 n 。将曲线坐标设为 (x, y) ,若光线经 BC 段全反射后以平行光垂直于出射面出射,则根据菲涅耳定律,满足以下方程组:

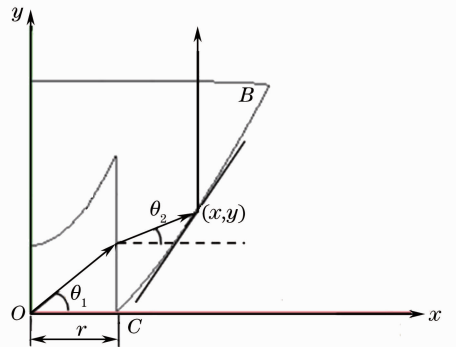


图 3 自由曲面部分计算示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the free-form curved surface

$$\begin{cases} y = y(x) \\ \sin \theta_1 = n \sin \theta_2 \\ \frac{dy}{dx} = \tan\left(\frac{\theta_2}{2} + \frac{\pi}{4}\right) \\ y' = r \tan \theta'_1 + (x - r) \tan \theta'_2 \\ x' = x + \frac{y' - y}{dx} dy \end{cases}, \quad (1)$$

式中 $x' - x = \Delta x$ 为递增参量, 可根据实际情况取一小量。采用积分迭代算法, 将 C 点坐标 $(0, r)$ 作为 (x, y) 的初始条件代入方程, 可得到 (x', y') ; 再将 (x', y') 当作 (x, y) 代入, 如此往复, 即可获得 BC 段的坐标。在设计过程中, 需要考虑全反射条件的满足, 本文计算中采用的聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 光纤材料在可见光区折射率取值 $n = 1.49$, 计算表明此时全反射临界角约为 42° , 小于 45° 。即使考虑极端条件: LED 光源的出射光线沿 OC 方向入射 (如图 3 所示), 此时由 $\theta_1 = 0$ 可得 $\theta_2 = 0$, 而方程组 (1) 中,

$$\frac{dy}{dx} = \tan\left(\frac{\theta_2}{2} + \frac{\pi}{4}\right) = \tan \frac{\pi}{4} = 1,$$

因此 BC 边在 C 点处的斜率为 1, 即此极端光线的入射角为 45° , 仍然满足全反射条件。所以, LED 出射的所有光线在 BC 段的入射角恒大于 45° , 满足全反射条件。

通过计算得到 BC 段的曲线坐标数据后, 将数据输入 Photopia 或其他专用模拟软件中, 并选用具体型号的 LED 芯片 (本文采用 Cree Xlamp 系列功率为 1 W 的白光 LED 作为实例), 根据其实测配光曲线, 进行模拟调试后, 即可完成全反射耦合器的设计^[12]。

由上述设计结果, 可以很方便地加工出需要的耦合器。图 4 即为耦合器三维 (3D) 模拟图以及实物照片。其中图 4(b) 为该耦合器与 LED 芯片的装配图, 图 4(c) 为裸耦合器图, 其出射面直径约为 17 mm。

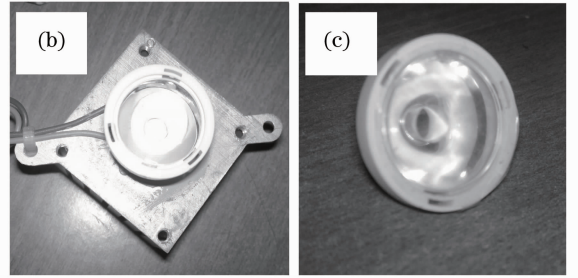
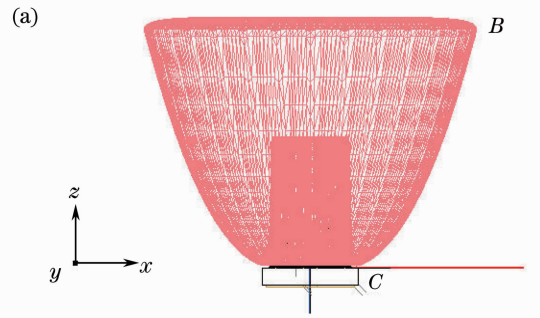


图 4 全反射耦合器。(a) 3D 模拟图; (b) 耦合器与 LED 装配图; (c) 裸耦合器

Fig. 4 Total reflection coupler. (a) 3D simulation diagram; (b) coupler assembled with a LED; (c) naked coupler

3 测试结果对比与分析

采用 Cree Xlamp 系列功率为 1 W 的白光 LED, 对制作的耦合器工作性能进行测试。分别对比 LED 与光纤直接耦合、LED 与反射式耦合器装配后与光纤耦合的配光曲线以及总光通量的变化^[13], 前者表征耦合器对于 LED 出射光的收束作用, 后者则表征耦合效率^[14]。

测试中 LED 电流为 $I = 350 \text{ mA}$, 采用内芯直径约为 17 mm、长度为 12 m 的 PMMA 塑料照明光纤, 光纤损耗约为 200 dB/km (570 nm 波长下), 数值孔径约为 0.5。光通量测试采用杭州远方的 PMS-80 紫外-可见-近红外光谱分析积分球 (直径为 2 m) 系统, 每个测量项目取 5 次平均值。测得的配光曲线如图 5 所示, 光通量效率如表 1 所示。

表 1 LED-光纤耦合器的光通量对比

Table 1 Comparison of the luminous flux efficiency of LED-fiber coupler

Order number	Tested item	Total luminous flux /lm
1	Naked LED	64.33
2	Naked LED coupled with a fiber	11.81
3	LED assembled with the coupler but without fiber	60.74
4	LED assembled with the coupler and with a fiber	21.72

从图 5 所示的配光曲线测试结果可以看出: 裸 LED 的发光近似服从朗伯分布^[6], 发散角较大 [图 5 (a)]; 但 LED 与耦合器耦合后, 光能量则主要

集中在 $\pm 5^\circ$ 以内 [图 5 (b)]。这说明全反射耦合器能极大地提升光源的中心光强, 而且很好地将对发散角控制在 $\pm 5^\circ$ 以内。从表 1 中所示的总光通量测试

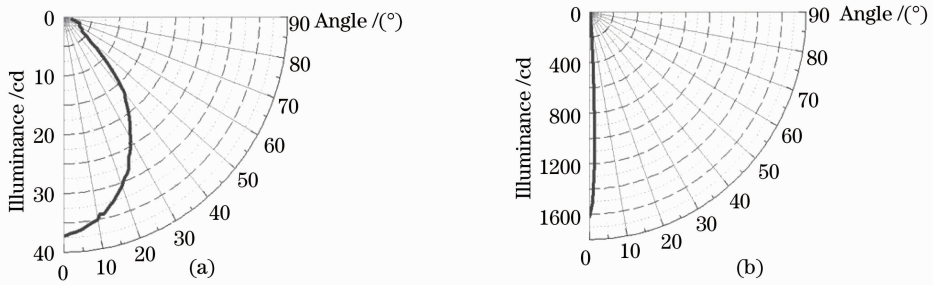


图5 配光曲线。(a) 裸LED; (b) LED加装耦合器

Fig. 5 Illuminance distribution curves. (a) Naked LED; (b) LED assembled with the coupler

结果可以发现:首先,LED芯片装配全反射耦合器后(序号3),总光通量为裸LED发光(序号1)的94.42%,说明加入耦合器本身对光源总光通量的损耗很小。LED芯片与光纤直接耦合(序号2)由于光线无法进行聚焦,效率非常低,其光通量仅约为裸LED发光(序号1)的18.36%;LED装配全反射耦合器后,再与光纤耦合(序号4),在相同的光纤损耗等系统衰减外,相对于LED与光纤直接耦合(序号2)的光通量增加达到83.91%,系统整体耦合效率有了明显的提升。因此,该全反射式耦合器具有较强的聚光能力,装配该耦合器后,LED芯片光源与照明光纤的耦合效率有显著提升,是一种极具应用潜力的LED-照明光纤耦合装置。

4 结 论

基于全反射原理设计并研制出LED-照明光纤耦合器,相对于目前采用的LED与光纤的直接耦合方式,其耦合效率提升超过80%。另外,经过该耦合器后LED光源发散角能够控制在 $\pm 5^\circ$ 以内,显示了耦合器很好的聚光能力。类似的设计方法在室内外照明领域已经有所应用,技术转换相对简单。而本文研制的整个耦合器集成度高,体积小,可以很容易地增加在现有LED光源/光纤机中。因此,本文所论及的全反射式LED-照明光纤耦合器具有耦合效率高、聚光能力强、设计简单和制作成本低等优点,结合光纤照明光电分离、装饰性强等特性,有望在一些照明领域获得推广应用。

致谢 感谢姜渭军、皇甫炳炎、项春彧、周小丽对本文的有益讨论以及测试中提供的帮助,感谢复旦大学学生科创行动项目支持。

参 考 文 献

1 Pan Liansheng. Application of optical fiber in display lighting of the Forbidden City [J]. *China Illuminating Engineering*

Journal, 2002, **13**(3): 44~45

潘连生. 光纤照明在故宫陈列室中的应用[J]. *照明工程学报*, 2002, **13**(3): 44~45

2 R. Berthet, A. Zerroukhi, G. Brun *et al.*. Synthesis and optical properties analysis of a new polymeric optical fiber for side lighting[J]. *Revue Roumaine de Chimie*, 2007, **52**(5): 471~480

3 Fan Liwei, Deng Xiangyang, Ren Hao. The design and development of special high-power LED lights with fiber[J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2010, **39**(1): 49~51

范力维, 邓向阳, 任 毫. 大功率LED光纤特种照明灯的设计开发[J]. *机电工程技术*, 2010, **39**(1): 49~51

4 Zhao Huifu, Liu Hua, Sun Qiang *et al.*. Design of RIXR LED collimating system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(7): 1472~1479

赵会富, 刘 华, 孙 强等. 基于折射/全反射/反射/折射结构的LED准直系统的设计[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(7): 1472~1479

5 Yu Guiying, Jin Ji, Ni Xiaowu *et al.*. Design for LED uniform illumination reflector based on étendue[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2297~2301

余桂英, 金 骥, 倪晓武等. 基于光学扩展量的LED均匀照明反射器的设计[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2297~2301

6 Wang Hong, Wang Haihong, Zhang Xiaofan *et al.*. Design method for axisymmetric uniform illumination system with LED [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2010, **21**(8): 1163~1166

王 洪, 王海宏, 张小凡等. 旋转轴对称LED均匀照明系统设计方法[J]. *光电子·激光*, 2010, **21**(8): 1163~1166

7 Su Zhouping, Que Lizhi, Zhu Zhuowei *et al.*. Optical system design of the compact collimator for LED source [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(2): 022203

苏宙平, 阙立志, 朱焯炜等. 用于LED光源准直的紧凑型光学系统设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(2): 022203

8 Li Lin, Wang Guangzhen, Wang Lili *et al.*. Lens design for uniform illumination with LED[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(2): 0222002

李 林, 王光珍, 王丽莉等. 实现均匀照明的LED系统设计方法[J]. *光学学报*, 2012, **32**(2): 0222002

9 Sun Liwei, Jin Shangzhong, Cen Songyuan. Free-form micro-lens design for solid state lighting[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(5): 860~865

孙理伟, 金尚忠, 岑松原. 用于固态照明的自由曲面微透镜设计[J]. *光子学报*, 2010, **39**(5): 860~865

10 Liu Xin. Total-internal-reflection compound secondary optical lens design of LED illumination[J]. *J. Applied Optics*, 2011, **32**(5): 976~980

刘 欣. LED照明的透射-全反射型复合曲面二次光学透镜的设计[J]. *应用光学*, 2011, **32**(5): 976~980

11 Ding Shushu, Yu Guiying, Hao Wenwen. A freeform surface

- lens for indoor uniform illumination[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(4): 042201
- 丁纾妹, 余桂英, 郝雯雯. 用于室内照明的自由曲面均匀配光透镜设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(4): 042201
- 12 Yang Bo, Wang Yongtian. Computer aided design of free form reflector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(6): 721~724
- 杨波, 王涌天. 自由曲面反射器的计算机辅助设计[J]. *光学学报*, 2004, **24**(6): 721~724
- 13 Yang Guoguang. *Modern Optical Measurement Technology*[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2004. 20~206
- 杨国光. *近代光学测量技术*[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004. 20~206
- 14 Li Gubo, Ge Wenping, Hao Sujun *et al.*. Adjustable coupling effect of plastic fiber dual taper and semisphere cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(8): 941~944
- 李谷波, 葛文萍, 郝素君等. 塑料光纤双锥与半球腔的活动耦合效应[J]. *光学学报*, 2003, **23**(8): 941~944

栏目编辑: 王晓琰