

非相干LED 白光产生无衍射光的光源设计

方 翔,江新光,吴逢铁,程治明,范丹丹

(华侨大学 信息科学与工程学院,福建 泉州 362021)

摘 要: 非相干光源产生无衍射光束的实验中,入射光束的均匀性对产生无衍射光束的质量有很大影响。文中以非相干光源白光 LED 为例,通过对 LED 自身发光特性的分析,对光线传播过程进行数学建模,用非成像光学光通量守恒原理,对均匀照明设计方法进行理论推导,得到了一种基于非成像光学产生均匀光束的透镜设计方法。用三维建模软件进行建模并用光学仿真软件进行光线追迹,确定用该方法设计的透镜能满足实验对入射光束均匀度的要求,并初步实验获得较高质量的零阶无衍射 Bessel 光,验证了该设计方法的合理性。

关键词: 非相干光源; 无衍射光束; 光学设计; 均匀光束

中图分类号: O435.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)01-0159-04

Design of incoherent light source LED for generating non-diffracting beams

Fang Xiang, Jiang Xinguang, Wu Fengtie, Cheng Zhiming, Fan Dandan

(College of Information Science & Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: In the experiment of the incoherent light source generating non-diffracting beams, the uniformity of the incident beams for generating high quality non-diffracting beams is significant. In this paper, incoherent white light LED was used as the light source. The propagation of light was simulated through analyzing the characteristics of LED light and design of uniform illumination was deduced in theory according to the conservation of light. Hence, the lens design method was obtained which could generate the uniform beam based on the non-imaging optics. With optical simulation software and ray tracing, it is shown that the design meets the requirement of uniformity of incident beams, and meanwhile, the rationality of design is demonstrated by the experimental result that high quality zero-order Bessel beam can be obtained with uniform distribution of beam intensity.

Key words: incoherent light source; non-diffracting beams; optical design; uniform beams

收稿日期:2012-05-06; 修订日期:2012-06-09

基金项目:国家自然科学基金(60977068,61178015);国家高功率激光物理重点实验室开放基金(SG001102);
泉州市科技重点项目(2011G9)

作者简介:方翔(1986-),男,硕士生,主要从事光束传输、变换与设计及 LED 光源照明系统方面的研究。Email:asjna@163.com

导师简介:吴逢铁(1958-),男,教授,博士,主要从事光束传输与变换、短脉冲技术及非线性光学等方面的教学与研究。

Email:fengtie@hqu.edu.cn

0 引言

无衍射光由美国 Rochester 大学的 J. Durnin^[1]于 1987 年首次提出,因其传输中保持光强分布不变、具有高度的局域化强度分布和自重建^[2-4]等特性而被广泛地应用于光学引导^[5]、粒子囚禁^[6]及原子光学^[7]等领域。目前对此类光束的产生方法^[8-11]已有不少的研究,但几乎都是基于相干光源(激光光源)。非相干光源相干性极差,同锥角的平面波很难相干叠加形成无衍射 Bessel 光,这方面的研究国内尚未涉足,国外研究也很少^[12]。相对于相干光源,非相干光源具有获取容易且对光源要求低等特点,能够大幅度地降低获取无衍射光束的光源成本。并且非相干光在光学断层扫描相干成像中能够提高图像的分辨率,因此用非相干光源产生无衍射光束具有其现实意义和较高的学术意义,同时对无衍射光束的推广应用也具有极大的推动作用。用轴棱锥法产生无衍射光束的实验中,可用相干光源(激光)经过准直后入射到轴棱锥而产生无衍射光束。但换成非相干光源后,发现入射光束光强的均匀性对无衍射光束的光束质量具有很大的影响。

LED 作为一种固态发光光源,具有节能、环保、寿命长、响应时间快和高显色性等诸多优点,而且随着相关研究工作的开展,其发光效率也得到显著提升,实验室光效已达 200 lm/W^[13-14],市场销售的 LED 光效也已达到 130 lm/W 以上,接近甚至超过了高压钠灯、金卤灯等气体放电灯。但由于 LED 发光成近似郎伯分布,在照明面上形成的照度沿径向迅速衰减^[15],如果直接应用将难以甚至无法形成高质量的无衍射光束。为了提高非相干光源产生的无衍射光束的光束质量,得到均匀分布的光场是非常关键的。文中针对 LED 光源光强分布不均匀的特点,以非相干白光 LED 为例,通过对光线传播过程进行数学建模分析,用非成像光学光通量守恒原理,对均匀照明设计方法进行理论推导,得到了一种基于非成像光学产生均匀光束的快速透镜设计方法,并初步实验获得较高质量的零阶无衍射 Bessel 光。

1 透镜设计

1.1 LED 光源

理想的 LED 光源是一个郎伯体,即光分布是以

垂直于发光面的轴线为零度角的余弦分布^[16],光强变化规律为:

$$I_{\theta} = I_0 \cos \theta \quad (1)$$

而目前市场上销售的 LED 光源的光强分布曲线并不完全遵循公式(1),为了使设计的透镜的出射光束的均匀性能满足实验需求,需要对公式(1)进行修正。公式(2)是修正后的实际 LED 光源的近似光强分布^[17]:

$$I_{\theta} = I_0 \cos^m \theta \quad (2)$$

式中: m 为一常量,其值由半光强度角 $\theta_{1/2}$ (定义为当光强在 0° 时一半的角度)决定

$$m = \frac{-\ln 2}{\ln(\cos \theta_{1/2})} \quad (3)$$

因此只要知道实际 LED 光源的半光强度角,就可以利用公式(3)求出 m 值,进而根据公式(2)得出近似的光强分布曲线。

1.2 设计原理

由于 LED 体积很小,相对于光学系统可以将其视为点光源,从而建立起简易的光学模型^[18]光路示意图,如图 1 所示。图中位于 A 点的 LED 发出的光线经透镜折射,到达相距为 L 的目标区域。其中光线 AB 与光轴 Z 的夹角为 θ ,透镜厚度为 d,透镜折射率为 n,空气折射率为 1, B 点坐标 (z_1, y_1) 。

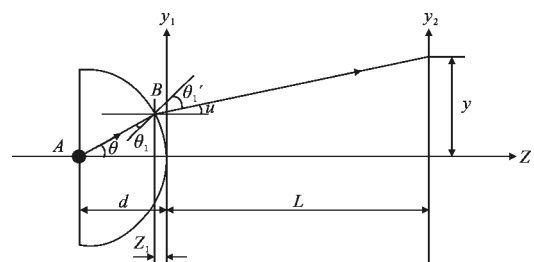


图 1 简化的 LED 光学模型光路图

Fig.1 Optical path for the simplified optical model of LED

(1) 建立发光角度与目标光场接受面的关系

为了使所设计的光学模型更接近实际,这里假设 LED 发出的光为近似郎伯分布,发光角为 θ ,目标区域的照度为 $E(y)$,则根据能量守恒定律有如下表达式:

$$\int_0^{\Omega} I_{\theta} d\Omega = \int_0^y E(y) 2\pi y dy \quad (4)$$

设计的要求是目标区域的照度均匀分布,所以可设目标区域处的接收屏上的照度 $E(y)$ 为一定值 E_0 ,联立公式(2),代上式得:

$$2\pi I_0 \left(-\frac{1}{m+1} \right) [\cos^{m+1}\theta - 1] = 4\pi y^2 E_0 \quad (5)$$

则当发光角最大为 θ_{\max} 时, 在目标接收屏上可形成最大半径为 R_{\max} 的光通量分布, 参照公式(5)有:

$$2\pi I_0 \left(-\frac{1}{m+1} \right) [\cos^{m+1}\theta_{\max} - 1] = 4\pi R_{\max}^2 E_0 \quad (6)$$

联立公式(5)、(6)两式, 可求出发光角 θ 与目标接收屏上 y 半径之间的关系:

$$y = R_{\max} \sqrt{\frac{1 - \cos^{m+1}\theta}{1 - \cos^{m+1}\theta_{\max}}} \quad (7)$$

(2) 建立透镜面上的点与目标光场光场接受面对应点之间的关系

由图 1 知, 透镜截面曲线的斜率为 dy_1/dz_1 , 结合 SNELL 定律 $n\sin\theta_1 = \sin\theta_1'$, 有:

$$\frac{dy_1}{dz_1} = -\frac{n\cos\theta - \cos\theta_1}{n\sin\theta - \sin\theta_1} \quad (8)$$

由图中的几何关系可以得到:

$$y_1 = (d+z_1)\tan\theta \quad (9)$$

对公式(9)两边微分, 并联立公式(8)得:

$$\frac{dz_1}{d\theta} = \frac{\frac{d+z_1}{\cos^2\theta}}{\frac{n\cos\theta - \cos\theta_1}{n\sin\theta - \sin\theta_1} + \tan\theta} \quad (10)$$

又知透镜的出光角度为:

$$\tan\alpha = \frac{y - y_1}{L - z_1} \quad (11)$$

将公式(7)、(9)两式代入可得:

$$\tan\alpha = \frac{R_{\max} \sqrt{\frac{1 - \cos^{m+1}\theta}{1 - \cos^{m+1}\theta_{\max}}} - (d+z_1)\tan\theta}{L - z_1} \quad (12)$$

联立公式(10)、公式(12), 采用 Runge-Kutta 法, 用 MATLAB 编程可得该方程的数值解, 得到 z_1 与 θ 的一一对应关系。再通过 $y_1 = (d+z_1)\tan\theta$ 得到相应的 y_1 值。

(3) 拟合透镜截面曲线, 构建光源模型

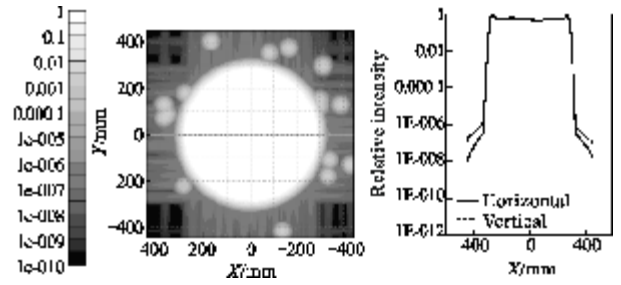
由数值解法求解出一系列的 (z_1, y_1) 后, 使用多项式拟合可得到透镜的截面曲线。导入到专业三维建模软件 Pro/E 建立起透镜的三维模型。然后, 在光学仿真软件 Tracepro 中导入三维模型并赋予模型材料、表面特性数据即可获得希望的光源模型结构。

2 理论模拟与实验验证

2.1 仿真模拟

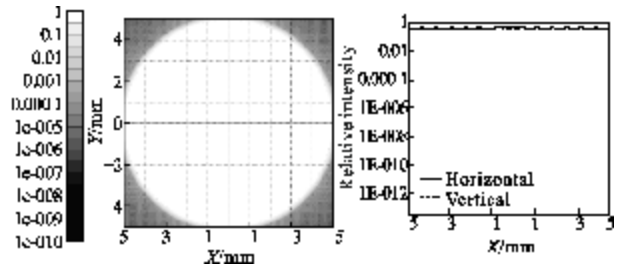
运用上述方法, 设计出一透镜。为了确定所设计

的透镜是否能满足本实验对入射光束均匀度的要求, 用光学仿真软件 Tracepro 分别对所设计出 LED 光源模型和实验所用的相干激光光源进行光线追迹。图 2 是经过光线追迹后所得到的目标平面的照度分布图及照度分布曲线图。



(a) LED 光源

(a) LED source



(b) 相干光源

(b) Coherent light source

图 2 照度分布图及分布曲线图

Fig.2 Illuminance distribution and illuminance distribution curve

比较图(a)、(b), 初步确定所设计的透镜符合该实验对入射光束均匀度的要求。

2.2 实验验证

为了更进一步地验证透镜设计的合理性和可行性, 分别用未经透镜配光的普通 LED 光源、经过透镜配光的 LED 光源以及氦氖激光光源进行实验, 图 3 是利用光束分析仪得到的以上 3 种光源经轴棱锥产生的无衍射光束的三维光强分布图。

实验结果显示, 所拍摄的的三组图形中, 入射光束均匀度最好的相干光源激光产生的光束的无衍射特性最为明显, 其次是经过透镜配光的 LED 光源, 而未经透镜配光的普通 LED 光源产生的无衍射光束的三维光强分布图最差。由此可以得出, 入射光束越均匀, 所产生的无衍射光束的光束质量越好。同时, 也说明了运用该设计方法设计出的透镜符合实验要求, 可以通过非相干白光 LED 得到较高质量的无衍射 Bessel 光。

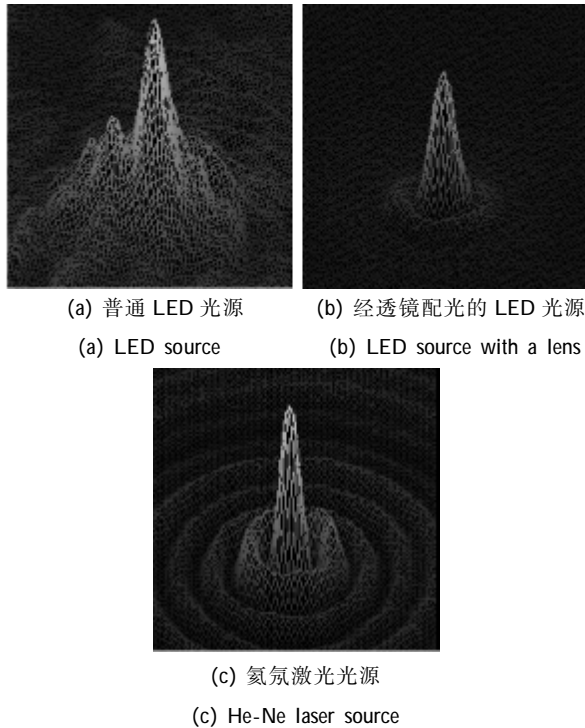


图 3 实验拍摄得到的无衍射光束的三维光强分布图

Fig.3 Three-dimensional intensity distributions of the non-diffracting beams captured in the experiment

3 结 论

在用非相干光源产生无衍射光束的实验中,入射光束的光强分布越均匀,所产生的无衍射光束质量越好。针对这一特性,文中提出了一种能产生均匀光束的透镜设计方法。根据非相干白光 LED 光源的发光特性,构建 LED 透镜的光学模型,通过能量守恒定律和 SNELL 定律得到透镜截面曲线方程,运用数值解法求解方程并拟合相关数据,将拟合后的透镜截面曲线导入到专业三维建模软件 Pro/E 建立透镜的三维模型,将模型导入到光学仿真软件 Tracepro 中进行光线追迹,确定了该方法设计的透镜能满足实验对入射光束均匀度的要求。最后用实验进一步验证了该设计方法的合理性,获得了较高质量的零阶无衍射 Bessel 光。

参考文献:

- [1] Durmin J, Miceli J J, Eberly J H. Diffraction-free beams [J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(15): 1499-1501.
- [2] Fahrback Florian O, Philippa Simom, Alexander Rohrbach. Microcopy with self-reconstructing beams[J]. *Nature Photonics*, 2010, 204: 1-6.
- [3] Wu Fengtie, Jiang Xinguang, Liu Bin, et al. Geometric optics analysis on self-reconstruction of the nondiffracting beam generated from an axicon [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(5): 312-315. (in Chinese)
- [4] Zhang Qian'an, Wu Fengtie, Zheng Weitao, et al. Self-reconstructing properties of high-order Bessel-Gauss beam[J]. *Scientia Sinica*, 2011, 41(10): 1131-1137. (in Chinese)
- [5] Tatarkova S A, Sibbett W, Dholakia K. Brownian particle in an optical potential of the washboard type [J]. *Physical Review Letters*, 2003, 91: 038101-1-038101-4.
- [6] Grier D G. A revolution in optical manipulation [J]. *Nature*, 2003, 14(424): 810-816.
- [7] Barrett M D, Sauer J A, Chapman M S. All-optical formation of an atomic Bose-Einstein condensate[J]. *Physical Review Letters*, 2001, 87: 010401-1-010401-4.
- [8] Wu Fengtie, Chen Yinbin, Guo Dongdong. Nanosecond pulsed Bessel-Gauss beam generated directly from a Nd:YAG axicon-based resonator[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(22): 4943-4947.
- [9] Li Z, Alici K B, Caglayan H, et al. Generation of an axially asymmetric Bessel-Like from a metallic subwavelength aperture [J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102: 143901-1-143901-4.
- [10] Lu Wenhe, Wu Fengtie, Zheng Weitao. Generation of non-diffraction Bessel-Liked beam using a lens axicon [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(6): 1618-1621. (in Chinese)
- [11] Kang S, Joe H E, Kim J, et al. Subwavelength plasmonic lens patterned on a composite optical fiber facet for quasi-one-dimensional Bessel beam generation[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98: 241103-1-241103-3.
- [12] Basanoa L, Ottonello P. Demonstration experiments on nondiffracting beams generated by thermal light[J]. *American Association of Physics Teachers*, 2005, 73(9): 826-830.
- [13] Zhou Yinhua, Tang Yingwen, Rao Jianping, et al. Improvement for extraction efficiency of vertical GaN-Based LED on Si substrate by photo-enhanced wet etching[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(1): 252-255. (in Chinese)
- [14] Chen Jian, Wang Qingkang, Li Haihua. Effect of random perturbation of structural parameters on the light extraction efficiency of light emitting diode with photonic crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(1): 233-236. (in Chinese)
- [15] Luo Yi, Zhang Xianpeng, Wang Lin, et al. Non-imaging optics and its application in solid state lighting [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(7): 963-971. (in Chinese)
- [16] Yu Guiying, Jin Ji, Ni Xiaowu, et al. Design for LED uniform illumination reflector based on tendue [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(8): 2297-301. (in Chinese)
- [17] Wood D. *Optoelectronic Semiconductor Devices*[M]. London: Prentice Hall, 1994.
- [18] Tai W, Schwarte R, Heinol H G. Optimisation of the light transmission and irradiance distribution of an aspherical lens for 3-D time-of-flight sensors [J]. *Optics Laser Technology*, 2000, 32: 111-116.