

Diffractive Optical Element for Direct-Lit Laser Backlight Unit

Zixue Liu, Qibin Feng, Guoqiang Lv*

National Engineering Laboratory of Special Display Technology, National Key Laboratory of Advanced Display Technology, Academy of Photoelectric Technology, Hefei University of Technology, Hefei Anhui
Email: 20110271lzx@mail.hfut.edu.cn, fengqibin@hfut.edu.cn, *guoqianglv@hfut.edu.cn

Received: Jun. 4th, 2018; accepted: Jun. 20th, 2018; published: Jun. 28th, 2018

Abstract

When used in a direct-lit backlight, the ellipse light spot of a laser diode has to be modulated to be rectangular. Aiming at the problem of small divergence angle and long mixing distance, a diffractive optical element for shaping laser light spot is designed by using diffractive optical element algorithm. First, the amplitude distribution of the input and output light fields and the imaging distance are determined. The diffraction formula and Gerchberg-Saxton algorithm are applied to calculate the phase distribution of the DOE in Matlab. Then the obtained phase distribution is input into the simulation software Virtual Lab for simulation. The simulation results show there exists the worse distortion on the spot and the power efficiency is not very high. The output light field distribution is modified and the DOE is then redesigned. The results show that the optimized DOE can effectively shape the elliptical light spot emitted by the LD into a rectangular spot of 14 mm × 11 mm. The energy efficiency is improved to 56.08% from the original 46.69%. The uniformity is improved to 87.16% from 80.59%. The design of the DOE in this paper can realize the shaping requirements of laser beam from circular Gauss beam to rectangular uniform spot, satisfying the requirements of a direct-lit backlight unit on luminance and uniformity.

Keywords

Laser Backlight, Beam Shaping, Diffractive Optical Element, Gerchberg-Saxton Algorithm

用于直下式激光背光模组的衍射光学元件设计

刘子学, 冯奇斌, 吕国强*

合肥工业大学, 特种显示技术国家工程实验室, 现代显示技术省部共建国家重点实验室, 光电技术研究院, 安徽 合肥
Email: 20110271lzx@mail.hfut.edu.cn, fengqibin@hfut.edu.cn, *guoqianglv@hfut.edu.cn

收稿日期: 2018年6月4日; 录用日期: 2018年6月20日; 发布日期: 2018年6月28日

*通讯作者。

摘要

激光光源用于直下式背光时, 需要将小尺寸的椭圆形光斑整形为符合显示面积要求的矩形均匀光斑。针对激光发散角小、用于直下式背光整形距离过长的问题, 利用衍射光学元件算法, 设计了一款对激光二极管(Laser diode, LD)进行整形的衍射光学元件(diffractive optical element, DOE)。首先, 确定输入和输出光场的振幅分布, 以及成像距离。接着, 利用MATLAB根据衍射公式和盖师贝格-撒克斯通算法计算出DOE的相位分布。然后, 将得到的DOE相位数据带入仿真软件VirtualLab中进行仿真。仿真结果发现光斑存在较严重的畸变, 并且能量利用率不高。对输出光场分布进行了改进, 重新设计了DOE, 并进行了仿真。结果表明: 优化后的DOE能有效地将LD出射的椭圆形光斑整形为14 mm × 11 mm的矩形光斑, 能量利用率从之前的46.69%上升到56.08%, 均匀性为从80.59%提升到87.16%。采用本文设计的DOE能实现激光光束从椭圆形高斯型光斑到矩形均匀光斑的整形要求, 满足直下式背光亮度和均匀性的要求。

关键词

激光背光, 光束整形, 衍射光学元件, 盖师贝格-撒克斯通算法

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

激光具有良好的单色性, 光谱范围很小。随着激光二极管(Laser diode, LD)的发展, 激光器的体积越来越小型化, 激光光源也逐渐被用在各种投影显示系统中, 例如: 激光电视[1] [2] [3]和激光投影机[4]。虽然激光光源在投影和激光电视中获得广泛应用, 但是作为液晶平板显示的背光源时, 激光光源还存在一些问题, 如: 激光光斑尺寸一般较小, 无法完整照明整个液晶面板; 激光光斑的能量分布呈典型的高斯分布, 需要进行均匀化。针对激光光源用于液晶显示背光模组存在的问题, 国内外的多家机构和学者开展了研究。2012年, 日本 Yuuto Okuda 等研究人员研制了采用侧出 LD 配合平面布置光纤结构的激光背光模组[5]。2013年, 山东大学孙玉宝提到了两种侧入式激光背光模组的结构[6]。2016年, 北京工业大学的王志平等提出了一种基于导光模块的激光背光光源设计[7], 长光所的赵致童等人对侧出发光光纤上出光孔的深度进行研究实现出光孔的均匀出光[8]。可以看出现有的激光背光模组中, 设计的光源多是面向侧出式背光模组, 侧出式背光需要结合导光板使用。侧出 LD 配合平面布置光纤结构的背光仍然需要较大的混光距离。如果不采用平面光纤结构, 直接采用现有的扩散膜的混光方法, 则将导致背光模组过长, 无法满足实际应用要求。

衍射光学元件(Diffractive Optical Element, DOE)在激光整形领域有着广泛的应用[9] [10] [11] [12]。本文就是试图利用衍射光学理论设计衍射光学元件, 以便对激光光束进行整形均光, 以适用于直下式背光模组。通过 DOE 元件进行整形均光, 可以减小背光模组的体积, 降低背光模组的重量。

2. 直下式激光背光模组结构

2.1. 现有直下式 LED 背光模组结构

现有的用于头盔显示的 0.63 英寸的直下式背光模组是由 2 × 2 阵列发光二极管(Light Emitting diode,

LED)和两片扩散膜组成,如图1所示。

图中包括四个 LED 发光光源,经过两层扩散膜后会得到亮度均匀的矩形光斑。

2.2. 直下式 LD 背光模组结构

将 LED 换成 LD 后,背光模组的结构也会有相应的变化,如图2所示。

图中位于背光模组中间的是 LD,第二个元件表示用于激光整形的 DOE。对于 0.63 英寸、长宽比为 4:3 的液晶显示区域,背光显示面积要略大于显示面积,设定为 14 mm × 11 mm。背光整体厚度限制在 15 mm 之内。故设定 LD 出射的光斑通过 DOE 后在距离 DOE 10 mm 的平面上形成尺寸为 14 mm × 11 mm 的均匀矩形光斑。

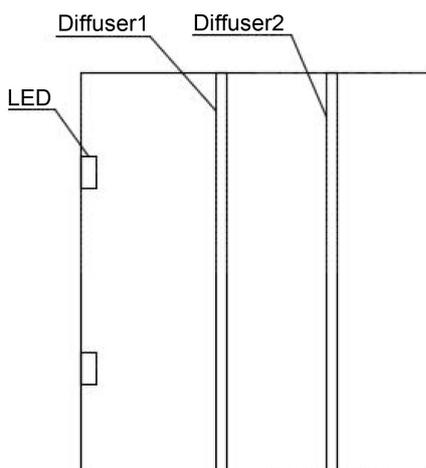


Figure 1. Direct-lit LED backlight unit
图 1. 直下式 LED 背光模组

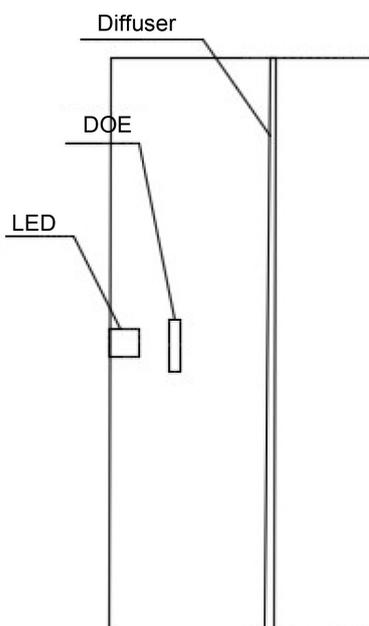


Figure 2. Direct-lit laser backlight unit
图 2. 直下式激光背光模组

3. 衍射光学元件设计理论

3.1. 理论基础

当入射光场垂直入射 DOE 所在平面, 假定入射光场的复振幅为 $g_0(x_1, y_1)$, DOE 的复振幅透过率为 $t(x_1, y_1)$, 则通过 DOE 后形成光场分布的复振幅分布可以表示为[13]:

$$g(x_1, y_1) = g_0(x_1, y_1) * t(x_1, y_1) \quad (1)$$

衍射成像面上的光场分布(即输出平面的光场分布)通过基尔霍夫衍射公式求得为[13]:

$$u(x_2, y_2) = \frac{1}{i\lambda} \iint_{-\infty}^{\infty} g(x_1, y_1) \frac{\exp(ikr)}{r} K(\theta) dx_1 dy_1 \quad (2)$$

式中: r 表示光的传播距离, 可表示为:

$$r = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + z^2} \quad (3)$$

其中, z 是输入平面和输出平面之间的距离。倾斜因子 $K(\theta)$ 表示为[13]:

$$K(\theta) = \frac{r+z}{2r} \quad (4)$$

这样, 根据已知的入射光场分布及需要的输出光场分布, 就可以推导出 DOE 的复振幅透过率, 进而得到 DOE 的表面形貌。

3.2. DOE 理论设计

由于输入光场的复振幅分布和输出光场的复振幅分布为已知条件, 求解 DOE 的复振幅分布就是求解公式(2)所形成的非线性方程。

盖师贝格—撒克斯通算法(GS 算法)是 1971 年 Gerchberg 和 Saxton 首先提出的[13], 用于解决相位恢复问题。GS 算法的基本思路是已知初始相位和事先给定的入射光场分布, 通过做正向衍射变换, 得到输出平面光场分布; 在输出平面引入限制条件, 以期望的光场振幅分布取代原光场振幅分布, 同时保持相位不变; 然后做逆向衍射变换, 得到输入平面光场分布; 在输入平面引入限制条件, 以给定的光场振幅分布取代原光场分布, 并保持相位不变; 接着重复上述正向和逆向衍射变换, 直到得到满意的结果或者达到足够的循环次数。算法流程图如图 3 所示。

从 LD 出射的光束能量呈高斯型分布, 其振幅分布可用数学公式表示为[13]:

$$U_{in}(x_1, y_1) = \exp\left[-(x_1^2 + y_1^2)/\omega^2\right] \quad (5)$$

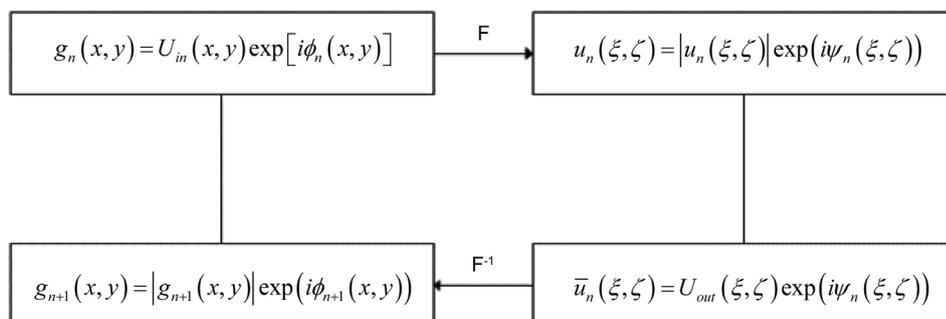


Figure 3. GS algorithm flow chart
图 3. GS 算法流程图

式中 ω 表示光束的束腰半径。

理想的输出光场的归一化数学表达式为[13]:

$$U_{\text{ideal}}(x_2, y_2) = \begin{cases} 1 & x_2, y_2 \in S \\ 0 & x_2, y_2 \notin S \end{cases} \quad (6)$$

式中 S 表示理想输出光场的范围。

衍射光学元件 DOE 的相位分布可以通过最终得到的相位分布减去初始相位分布求得, 表示为 $\phi_n(x_1, y_1) - \phi_0(x_1, y_1)$ 。

在实际情况下, 光波相位的改变是通过引入光程差。光程差是光波在均匀介质中传播时通过不同距离产生的。所以得到了 DOE 的相位分布后在实际中进行制作时需要将相位转化为微结构的高度。

4. 软件仿真及优化

根据上一节的理论依据和算法流程在 MATLAB 中对 GS 算法进行编程。将输入光场和输出光场的复振幅分布带入程序, 计算出 DOE 的相位分布 $\phi_{\text{doe}}(x, y)$ 。然后通过相位与微结构高度之间的关系计算出设计的表面微结构的高度分布 $h_{\text{doe}}(x, y)$ 。然后将得到的相位数据导入仿真软件中进行仿真实验验证。

在实际的背光模型中, 由于 DOE 只能放置在 LD 外部(不能放置在束腰处), DOE 与 LD 之间存在一定的距离。LD 出射的光束在水平偏振方向和垂直偏振方向的发散角度不同, 导致出射光斑为椭圆形光斑, 其振幅分布呈高斯型。因此在设计时要根据 DOE 所在位置的光斑大小进行计算。输入光斑的尺寸可以通过发散角和出射距离进行计算:

$$R_0 = r_0 + d * \tan \theta \quad (7)$$

式中: R_0 表示 DOE 所在平面的光斑半径; r_0 表示原始光斑半径; d 表示 DOE 所在平面与出光孔径所在平面之间的距离; θ 表示发散角度。

根据平行偏振方向和垂直偏振方向上的发散角可以得到入射在 DOE 上的光斑尺寸。输入光场的分布可以表示为:

$$U_{\text{in}}(x, y) = \exp \left[- \left(\frac{x_1^2}{R_x^2} + \frac{y_1^2}{R_y^2} \right) \right] \quad (8)$$

在设计过程中, 为了提高计算速度而采用基于傅里叶变换形式的菲涅尔衍射公式进行衍射计算。理想输出光场分布设置为 $14 \text{ mm} \times 11 \text{ mm}$ 的矩形带入设计程序中进行计算, 得到对应的 DOE 的相位分布。在 VirtualLab7.0.2 仿真软件中建立相应的光学传播系统, 并将计算出的 DOE 相位导入进行仿真, 得到面上的光场分布, 如图 4 所示。

从结果中可以看到, 仿真得到的光斑尺寸要大于理想光斑尺寸(黑色虚线框), 并且在光斑的上下两边存在严重的畸变。经测量, 理想光斑尺寸内的能量为 37.35 mW 。根据公式(9)可以计算能量利用率, 光源总能量为 80 mW , 能量利用率为 46.69% 。过大的光斑会降低目标范围内 DOE 的能量利用率, 进而降低背光亮亮度。

$$\eta = \frac{E_{\text{target}}}{E} \quad (9)$$

式中 η 表示能量利用率; E_{target} 表示目标范围内的能量; E 表示光源总能量。

根据《数字电视平板显示器测量方法》标准定义的九点法对目标范围内的光斑均匀性进行了计算[14]。九点布置如图 5 所示, 九点照度数据如表 1 所示。

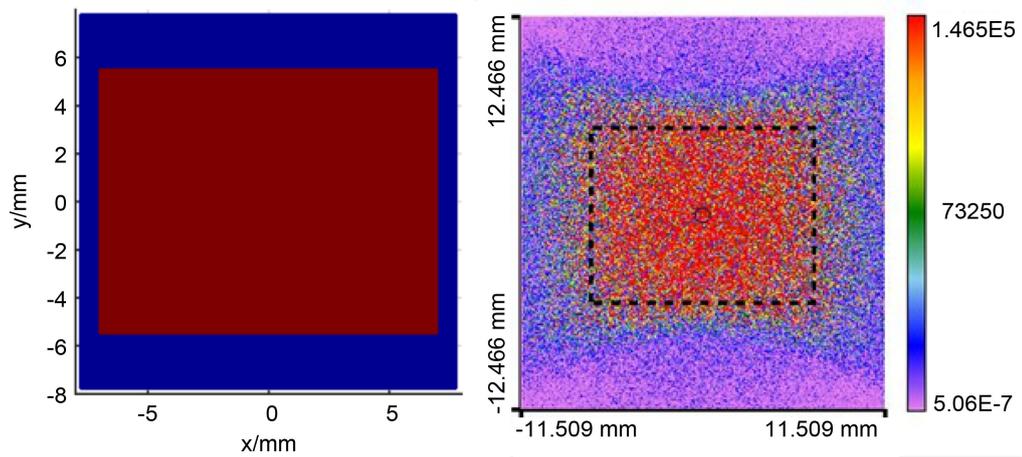


Figure 4. Ideal light field distribution and its simulation results
图 4. 理想光场分布及相应的仿真结果

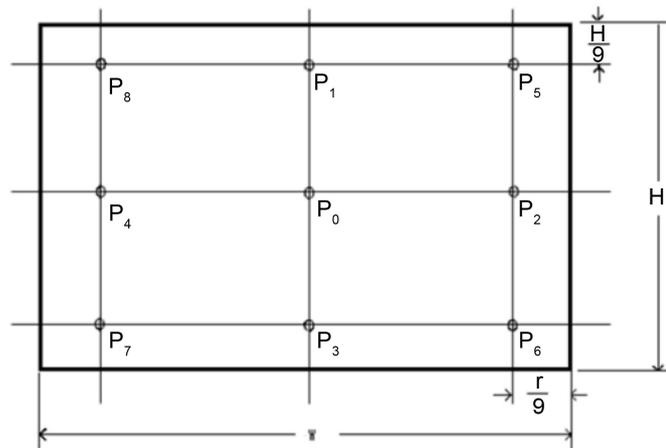


Figure 5. 9 points
图 5. 9 点布置图

Table 1. Illumination value of nine points
表 1. 九点照度值

点	照度(lux)
P ₀	165,205.95
P ₁	112,896.55
P ₂	91,457.80
P ₃	130,092.17
P ₄	91,239.58
P ₅	113,885.81
P ₆	91,564.48
P ₇	130,741.98
P ₈	92,093.06
平均值	113,241.93

均匀性的计算根据公式(10)

$$u = I_{\min}/I_{\text{ave}} \quad (10)$$

式中 u 表示均匀性； I_{\min} 表示最小照度值； I_{ave} 表示平均照度值。

经计算得到平均照度为 113,241.93lx，均匀性为 80.57%。

经过分析，图 4(b)中的畸变是因为在设计过程中使用的衍射计算公式是基于菲涅尔衍射的。菲涅尔衍射公式对基尔霍夫衍射公式中波的传播距离 r 的计算进行了近似。通过牛顿二项式对 r 进行分解可以得到公式(11)：

$$r = z + \frac{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}{2z} + o\left(\frac{((x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2)^2}{8z^3}\right) \quad (11)$$

当 z 远大于 x_1 、 y_1 、 x_2 、 y_2 时，最后一项在 $\exp(ikr)$ 中影响很小，可以忽略。但是在文中的设计要求下， z 与 x_2 、 y_2 相差不大，导致最后一项在计算过程中不应该被忽略。而菲涅尔衍射公式忽略了这项，就会在光波的传播距离的计算上带来一个误差，从而影响光波的传播到目标平面的相位。这个误差会影响目标平面上的各点的振幅大小。

通过对理想输出光场的形状和振幅分布进行一定的变换可以使实际衍射场更接近理想光场[15]。对基尔霍夫的相位项进行更精确的近似。令 $R = \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z^2}$ ，对 r 进行展开：

$$r = R + \frac{-2x_1x_2 - 2y_1y_2 + x_1^2 + y_1^2}{2R} + o\left(\frac{(-2x_1x_2 - 2y_1y_2 + x_1^2 + y_1^2)^2}{8R^3}\right) \quad (12)$$

忽略式(12)中第三项带来的相位影响，得到近似的衍射公式为：

$$u(x_2, y_2) = \frac{\exp(ikR)}{i\lambda z} \frac{z}{R} \iint_{-\infty}^{\infty} g(x_1, y_1) \exp\left(ik \frac{x_1^2 + y_1^2}{R}\right) \times \exp\left[-\frac{ik}{z} \left(x_1 \frac{zx_2}{R} + y_1 \frac{zy_2}{R}\right)\right] dx_1 dy_1 \quad (13)$$

$$\begin{cases} x_3 = \frac{z}{R} x_2 \\ y_3 = \frac{z}{R} y_2 \\ u(x_2, y_2) = \frac{z}{R} u(x_3, y_3) \end{cases} \quad (14)$$

按式(13)对理想输出光场进行坐标变换可以使实际的输出光场更接近于矩形的输出光场。

将输入光场分布和修正后的输出光场分布带入设计程序中重新进行计算，可以得到对应的 DOE 相位分布。在 VirtualLab 中建立相应的光学传播系统，并将计算出的 DOE 相位导入进行仿真。在 10 mm 上得到相应的衍射图样。修改后的理想输出光场和仿真得到的输出光场如图 6 所示。

从仿真结果的照度图中可以看出光场主要集中在目标范围 14 mm × 11 mm 内，衍射场的尺寸略大于理想的尺寸。和修改前的 DOE 的衍射场比较，在上下两边基本没有畸变。经测量，理想光斑尺寸内的能量为 44.86 mW，能量利用率为 56.08%。按照九点法对目标范围内的光斑均匀性进行测量。九点的照度数据如表 2。

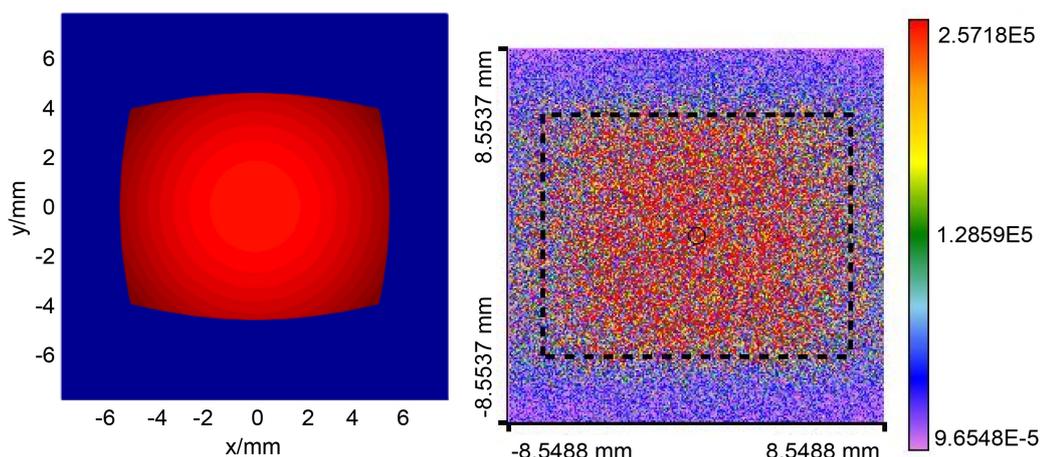


Figure 6. The optimized ideal light field distribution and its simulation results

图 6. 改进后的理想输出光场及相应的仿真结果

Table 2. Illumination value of nine points of the optimized design

表 2. 改进设计后的九点照度值

点	照度(lux)
P ₀	181,349.27
P ₁	150,226.46
P ₂	134,364.40
P ₃	165,283.54
P ₄	140,115.67
P ₅	149,644.55
P ₆	134,199.53
P ₇	166,384.33
P ₈	130,994.14
平均值	150,284.65

经计算得到平均照度为 150,284.65lx，均匀性为 87.16%。能量利用率和均匀性都得到提升。

5. 结论

本文针对 0.63 英寸直下式激光背光模组需要在较小的距离进行整形的要求，设计了基于衍射理论的光学元件，并进行了仿真验证。仿真结果表明：设计的 DOE 能有效地将 LD 出射的椭圆形光斑整形为 14 mm × 11 mm 的矩形光斑，能量利用率达到 56.08%，平均照度为 150,284.65lx，均匀性为 87.16%，满足背光实际使用要求。

基金项目

安徽省科技重大专项项目(No. 17030901003, No. 17030901033, No. 16030901001)。

参考文献

- [1] 丁海生. 基于 Lcos 的激光背投电视的光机设计[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2010.
- [2] 陈旭, 冯玉涛, 刘伟奇, 等. 大屏背投激光显示广角镜头的设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(5): 945-950.

- [3] 张岳, 郝丽, 柳华, 等. 激光显示的原理与实现[J]. 光学精密工程, 2006, 14(3): 402-405.
- [4] 梁传样. 激光投影显示光学系统关键技术研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2017.
- [5] Okuda, Y., Onoda, K., *et al.* (2012) Laser Backlight Unit Based on a Leaky Optical Fiber. *Optical Engineering*, **51**, 0740011-0740018. <https://doi.org/10.1117/1.OE.51.7.074001>
- [6] 孙玉宝. 液晶平板显示激光背光模组的设计与实验研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2013.
- [7] 王志平, 曹银花, 刘友强, 等. 蓝光 LD 平板显示背光模组设计[J]. 中国激光, 2017, 44(5): 0505003.
- [8] 赵致童, 张贺, 邹永刚, 等. 液晶显示器激光背光光源侧体发光光纤的设计与研究[J]. 中国激光, 2017, 44(3): 0301004.
- [9] 张巍, 梁传样, 李金, 等. 用于激光数字投影显示系统的匀光整形元件设计[J]. 光学学报, 2015, 35(8): 44-49.
- [10] 李森森, 吴凡, 吕志伟. 基于液晶空间光调制器的激光近场光束整形[J]. 光电技术应用, 2017, 32(3): 19-23.
- [11] 梁传, 张巍, 芮大为, 等. 基于硅基液晶实现激光投影显示系统匀光整形和散斑抑制[J]. 中国激光, 2016, 43(12): 20-26.
- [12] 田志辉, 刘伟奇, 李霞, 等. 激光显示中散斑的减弱[J]. 光学精密工程, 2007, 15(9): 1366-1370.
- [13] 颜树华. 衍射微光学设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [14] 李剑, 王海燕, 李强, 等. SJ/T 11348-2006 数字电视平板显示器测量方法[S].
- [15] 庞辉, 张满, 邓启凌, 等. 基于瑞利-索末菲积分的大衍射角衍射光学元件设计方法[J]. 光子学报, 2015, 44(5): 173-178.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2164-5450, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: oe@hanspub.org