光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021.04.009

Mini LED 背光源在液晶显示面板上的照度均匀性

童嘉俊[1]，尤宇财[1]，王海波[2,3]*，卓宁泽[4]

（南京工业大学 1. 材料科学与工程学院，南京 211816；2. 电光源材料研究所，南京 210009；
3. 轻工业部南京电光源材料科学研究所，南京 210015；4. 江苏长晶科技有限公司，南京 211800）

摘　要： 基于 Taguchi 实验方法和 Tracepro 仿真软件，研究了 Mini LED 背光模组中 LED 芯片大小、芯片发光半角、芯片出光面到液晶层的距离等因素，对液晶面板照度均匀性的影响规律并对其进行了相应分析。研究结果表明：芯片出光面到液晶层的距离对照度均匀性影响最大，影响因素的权重占比达到 82.88%；发光半角占比 14.33%；芯片大小占比为 14.33%。根据研究结果，固定发光半角与芯片尺寸，调节出光面与液晶面板层的距离，得到了最优的照度均匀度。

关键词： Mini LED；背光模组；芯片大小；发光半角；照度均匀性

中图分类号： TN873.93　**文章编号：** 1001－5868(2021)04－0493－06

Uniformity of Mini LED Backlight on LCD Panel

TONG Jiajun[1], YOU Yucai[1], WANG Haibo[2,3], ZHUO Ningze[4]

(1. College of Material Science and Engin., Nanjing Tech University, Nanjing 211816, CHN;
2. Research Institute of Electric Light Source Materials, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, CHN;
3. Institute of Electronic and Photonic Materials of Light Industry, Nanjing 210015, CHN;
4. Jiangsu Changjing Technology Co. Ltd., Jiangsu 211800, CHN)

Abstract: The influence of the factors such as the LED chip size, the emission half Angle and the distance from the luminous surface to the LCD panel layer in Mini LED backlight modules, on the illumination uniformity of the LCD crystal panel was studied and analyzed with Taguchi experimental method and Tracepro software. The results show that the distance from the luminous surface to the liquid crystal layer has the greatest influence on the illuminance uniformity, and the weight of the influencing factors is 82.88%, and that of the luminous half angle and the chip size is both 14.33%. According to the research results, the optimal illumination uniformity is obtained by fixing the luminescence half angle and the chip size and adjusting the distance between the luminous surface and the LCD panel layer.

Key words: Mini LED; backlight module; chip size; luminous half angle; illumination uniformity

0　引言

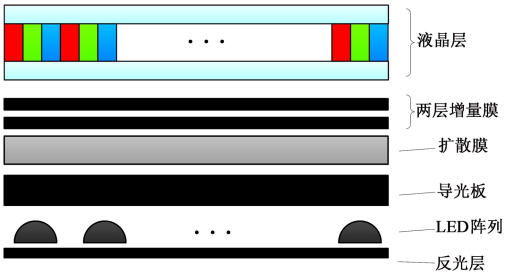
随着可视通话、远程医疗、虚拟现实、电动汽车、物联网等新技术的发展，显示器已经成为人机交互的重要界面，人们对显示器在分辨率、能耗、成本、厚度等方面有了更高的要求。目前平板显示技术主要有 LCD，LED，OLED 和 micro LED，LCD 显示器的市场占有率最高。LCD 技术和其他显示技术不同，是被动发光技术，LCD 显示器主要由液晶和的背光源组成，LCD 显示器背光源已经从过去的冷阴极背光源(CCFL)，发展成为白光 LED 背光源。LED 背光源具有能耗低、寿命长、成本低等优点。

收稿日期：2021－03－31.

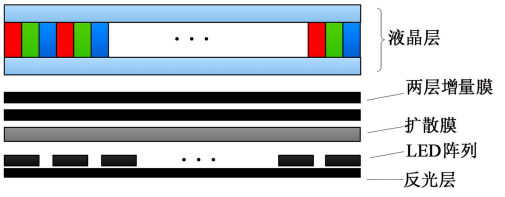
基金项目：国家重点研发计划项目(2016YFB0400600)；江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)；江苏省自然科学基金项目(BK20171128).

* **通信作者：**王海波　**E-mail：**wanghaibo88@163.com

普通 LED 背光源采用侧发光技术，为了保证光强度和光的均匀性，需要使用均光板，有一定的光损失。直下式 LED 背光源是将 LED 模组安装在 PCB 基板上，光源发出的光经过二次光学设计，通过导光板、散光膜和增亮膜后，形成光线的均匀分布[1]，从而提高了光的使用效率、降低功耗。其缺点是配光困难、光路较长，液晶屏的厚度较厚。Mini LED 作为新一代的 LED 芯片技术，比传统 LED 芯片更小，芯片尺寸约为 50～200μm，既可以作为 LED 显示光源，也可以用作为液晶背光模组。由于 Mini LED 芯片尺寸小，具有发光效率高、光强分布更加均匀的特点。采用 Mini LED 制成的背光模组，将倒装 Mini LED 芯片直接封装在背光基板，芯片阵列出光均匀，无需透镜进行二次光学配光，就可以实现均匀出光，光路较短，减少了导光板和增亮膜，扩散膜也更薄，提高了光线利用率，降低了整机厚度，使 LCD 屏功耗更低，实现超薄化[2-3]（如图 1 所示）。



（a） 传统直下式背光结构



（b） Mini LED 背光结构

图 1 传统直下式背光与 Mini LED 背光结构对比图

Mini LED 作为一种新型 LCD 背光源，目前的研究主要集中于对芯片阵列的排布上，对投射照度均匀性的研究较少。特别是，为了达到均匀混光，假设的混光距离都较远，通过改变发散角和光斑半径，达到均匀混光的目的。但是，较远的光学混光距离，直接导致矩形阵列的投影成为椭圆形的光斑[4-7]，研究结果与实际应用存在较大的偏差。实际应用中光源与受照面混光距离较近，同时在保证合适混光距离的情况下要满足高均匀度要求。本文通过 Taguchi 实验和 Tracepro 仿真相结合，对 Mini LED 背光模组中影响照度均匀性的 LED 芯片大小、芯片发光半角、芯片出光面到液晶层的距离等因素，进行仿真分析，对影响因素的占比权重进行量化计算，并通过优化上述变量，获得了最佳照度均匀性的参数组合，为近距离 Mini LED 背光源的发展提供了理论基础。

1 研究方法和路线

1.1 单颗芯片模型

Mini LED 的芯片尺寸为 50～200 μm，本研究可以视其为点光源，其发光角度分布符合朗伯余弦定律[8]：

$$I(\theta)=I_0\cos^m\theta \tag{1}$$

式中，$I(\theta)$是发光角度为 θ 方向上的光照强度，m 值的大小由 LED 发光区域与球面密封材料的曲率中心的相对位置所决定，与发光半角有关（指发光强度值为法向强度值一半的方向与发光法向的夹角），由半值角 $\theta_{1/2}$ 定义可以知道，当 $\theta=\theta_{1/2}$ 时，$I(\theta_{1/2})=\frac{1}{2}I_0$，故有

$$\frac{1}{2}I_0=I_0\cos^m\theta_{1/2} \tag{2}$$

即

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

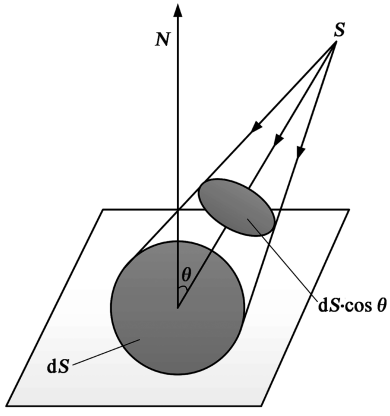


图 2 单个芯片照度示意图

对于空间中最简单的 *LED* 芯片来说，照射到垂直于其光轴的平面时，接收面上的光照度可以由式(4)得；

$$E(r,\theta)=\frac{I(\theta)}{r^2}=\frac{I_0\cos^m\theta}{r^2} \tag{4}$$

式中，r 为发光平面与接收面之间的距离，由图 2 可以推得 $\cos\theta=\frac{z}{r}$，$r^2=x^2+y^2+z^2$，将式(4)转化为

直角坐标系表示，则在三维空间内 *LED* 光源(X，Y，Z)到目标平面上任一点 P(x，y，z)的光照强度可表示为[9]

$$E(x,y,z)=\frac{z^m I_0}{\left[(x-X)^2+(y-Y)^2+Z^2\right]^{\frac{m+2}{2}}} \tag{5}$$

1.2　相邻芯片最大平坦照明距离

两颗 Mini LED 的辐照能量大致呈现两条高斯分布，在接收平面辐照度相叠加形成一个新的辐照能量函数。当两颗 LED 处于最大平坦距离时，其叠加函数中部也会出现一个平坦区域；当两颗距离超过极限距离，阵列中心将会出现一个波谷，当两颗距离小于极限距离则会出现一个新的波峰，如图 3 所示斯派洛极限值，可以由下式得；

$$\begin{cases}\dfrac{d}{dx}\left[f(x)+f(x+\sigma_L)\right]=0\\ \dfrac{d^2}{dx^2}\left[f(x)+f(x+\sigma_L)\right]=0\end{cases} \tag{6}$$

由于 LED 是一种非相干光源，因此两颗 LED 的排列对目标平面某一位置 $P(x,y,z)$ 的照度 E 为这两颗 LED 的照度叠加[10]：

$$E(x,y,z)=z^m I_0\left\{\left[\left(x-\frac{d}{2}\right)^2+y^2+z^2\right]^{-\frac{m+2}{2}}+\left[\left(x+\frac{d}{2}\right)^2+y^2+z^2\right]^{-\frac{m+2}{2}}\right\} \tag{7}$$

其中，d 为两颗 LED 的中心距离。根据斯派罗法则可知，对式中的 x 求二次偏导在 $x=0$，$y=0$ 处，令 $\partial^2 E/\partial x^2=0$ 得最大平坦度条件：

$$d_{\max}=\sqrt{\frac{4}{m+3}}\cdot z \tag{8}$$

表 1　不同发光半角对应 *m* 值以及理想最佳照射高度

发光半角	30	45	60
m	4.82	2	1
z	0.71d	0.89d	d

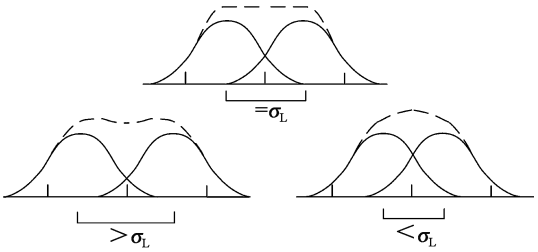


图 3　斯派罗法则示意图

1.3　白光背光模组的实现

与大功率侧发光白光 LED 背光模组光源不同，Mini LED 背光光源直接采用 RGB 三基色芯片组合来实现全色彩背光。本研究 RGB Mini LED 芯片采用如图 4 所示错位交替排布，整个背光模组由无数个照度均匀的面光源拼接而成。

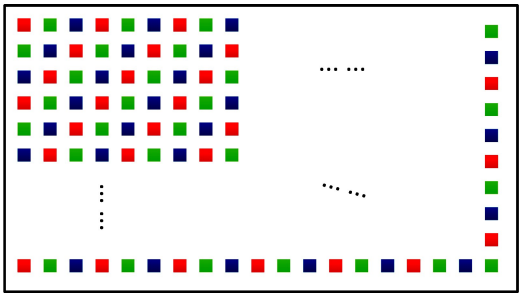


图 4　背光模组芯片排布示意图

1.4　照度均匀度

采用九点法测量各点照度，计算出点 $P_1\sim P_8$ 照度的算术平均值即平均照度(E_{av})，照度均匀度(u)是平均照度与最大照度点 P_0(E_{max})的比值[13]。

$$u=\frac{E_{av}}{E_{max}} \tag{9}$$

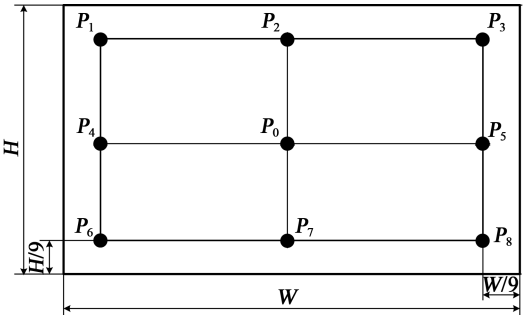


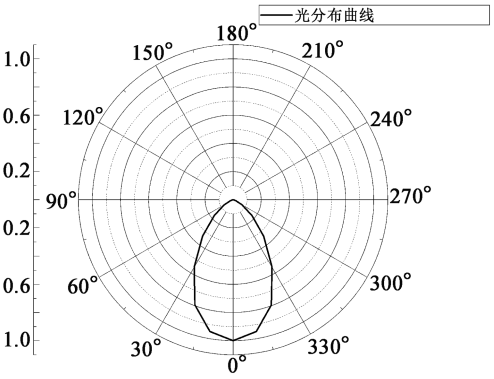
图 5　九点法均匀度示意图

2　照度均匀度实验

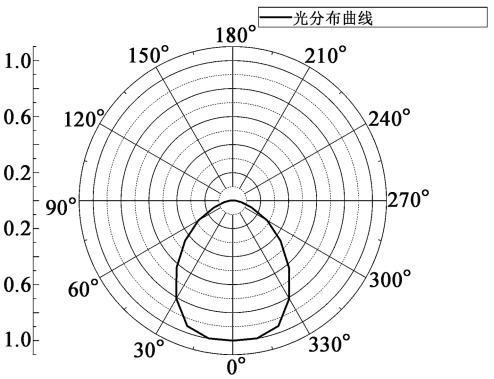
影响接收面照度均匀度的主要因素包括芯片的发光半角、出光面与接收面距离、芯片大小等，本实验主要研究上述三个因素对照度均匀度的影响。本研究影响因子有 3 个，每个因子有 3 个水准，利用 Taguchi 方法设计采用 $L_9(3^4)$ 正交实验表。为研究均匀度变化情况，对中心 32×18 的阵列进行模拟，各因子的水准设置如表 2 所示，定义单颗芯片发光半角为 30°，45°，60°，如图 6，芯片边长为 0.1，0.15 和 0.2 mm，背光源与液晶层的距离为 0.6，1.2 和 1.8 mm，所有芯片总光通量约为 40 lm[15-16]，接收面定义为完全吸收(Perfect absorber)，接受尺寸为 38.233 mm×20.961 mm，网格划分成 128×128。

表 2 照度均匀度影响因子及其控制水准

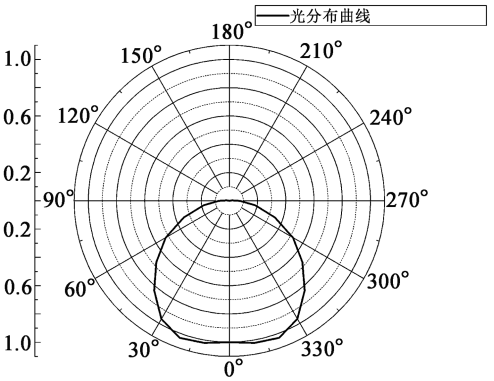
代号	因子名称	水准数	水准一	水准二	水准三
A	单颗芯片发光半角	3	30	45	60
B	芯片尺寸	3	0.1 mm	0.15 mm	0.2 mm
C	背光层与液晶层的距离	3	0.6 mm	1.2 mm	1.8 mm



(a) 发光半角 30 的芯片



(b) 发光半角 45 的芯片



(c) 发光半角 60 的芯片

图 6 三种发光半角的配光曲线

选取好因子及其水准后，根据正交表的组合，使用 TracePro 软件进行模拟，得到接收面的照度之后利用 MATLAB 软件进行数据筛选，剔除掉由于边缘效应产生照度值急剧下降的数值，利用公式(10)进行辐照均匀度的计算，得到每组实验的辐照均匀度。最后使用 Minitab 软件，对于田口实验中 S/N 值进行计算得到表 3。

表 3 $L_9(3^4)$正交实验表

实验序号	A	B	C	照度均匀度/%	照度均匀度的信噪比 S/N
1	1	1	1	90.15	39.09
2	1	2	2	89.25	39.01
3	1	3	3	88.46	38.93
4	2	1	2	89.25	39.01
5	2	2	3	88.44	38.93
6	2	3	1	90.03	38.09
7	3	1	3	88.17	38.91
8	3	2	1	89.25	39.01
9	3	3	2	88.80	38.97

3 照度均匀度分析

3.1 实验数据分析

根据上文所述，由表 3 中可以看出，实验 1，6，8 的辐照均匀度较高，它们的受照距离都是 0.6 mm。实验 3，5，7 的辐照均匀度都较低，接收距离都为 1.8 mm 说明接受距离在这些影响因素中可能影响程度最大。进一步分析在田口设计中，控制因子的各水准分别对品质特性的影响程度。S/N 的值可分成以下两种类型进行计算[17]：

(1)望大特性，其品质特性是越大越好，使响应最大化，公式为

$$S/N = -10\lg\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{y_i^2}\right] \tag{10}$$

(2)望小特性，其品质特性是越小越好，使响应最大化，公式为

$$S/N = -10\lg\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}y_i^2\right] \tag{11}$$

本实验的目的是利用 Mini-LED 阵列模拟一次光学设计时液晶层上的照度均匀度变化，对于该品质特性，预期是提升均匀度，所以，采用望大特性计算 S/N 值。图 7 有效清晰地展示了各水准 S/N 值对均匀度的影响程度。

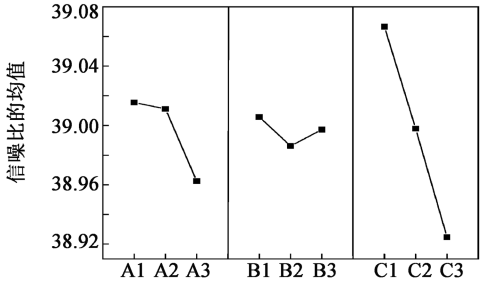


图 7 辐照均匀度信噪比主效应图

3.2　因子贡献率分析

为了进一步具体探究各因子对品质特性的影响程度，我们采用了 ANOVA 方法。ANOVA 又称为“变异数分析”一般用于两个及两个以上样本，以方差分析来进行显著性检验，在 Taguchi 方法中当因子效应和实验误差比较起来足够大时，才认定该因子的效应是“重要的”，“重要性”的强弱采用参数 ρ 表示：

$$\rho=\frac{SS_{\mathrm{d}}}{SS_{\mathrm{T}}} \tag{12}$$

$$SS_{\mathrm{T}}=SS_{\mathrm{d}}+SS_{\mathrm{e}} \tag{13}$$

其中，SS_{d} 表示方差和，SS_{e} 表示错误的方差和（考虑到在本次分析中，SS_{e} 接近于 0，因为仿真的错误率极低，具有可重复性）。方差 SS_{T} 由 S/N 比的方差和给出。

$$SS_{\mathrm{d}}=\sum_{i=1}^{m_i}(\eta_i-\eta_m)^2 \tag{14}$$

其中，m 是实验数，η_i 是每个因子第 i 次实验的 S/N 比，η_{m} 为 S/N 值的平均值，在本实验中 $\eta=LTB(S/N)$。

表 4　各因子对照度均匀度的贡献率

因子	贡献率/%
A	14.33
B	1.58
C	82.88
其他因素	1.21

3.3　增补实验数据分析

由图 7 可以得到最佳因素组合为 A1B1C1，混光距离 OD 为主要因素，芯片尺寸为次要因素，在实际应用中 C 因素也为最易调控因素，因此进一步探求混光最佳距离。A 因素中 30°以及 60°的发光半角影响程度较高，B 因素中 0.1 与 0.2 的边长影响程度较高，因此采用 A1B1，A1B3，A2B1，A2B3 的组合为基础近一部细化 C 因素可以得到均匀度改善情况（图 8）。

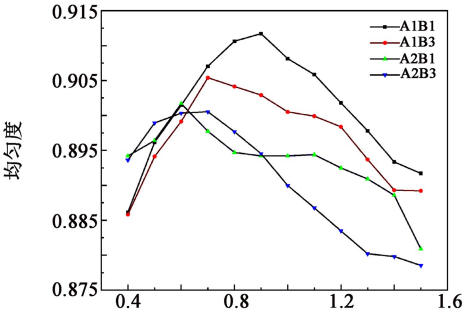


图 8　不同组合下均匀度随高度变化的趋势

可以看出能实现最佳照度均匀度的依旧是 A1B1 组合，且不断调整高度最佳均匀度能达到 91.17%，如图 9 所示。

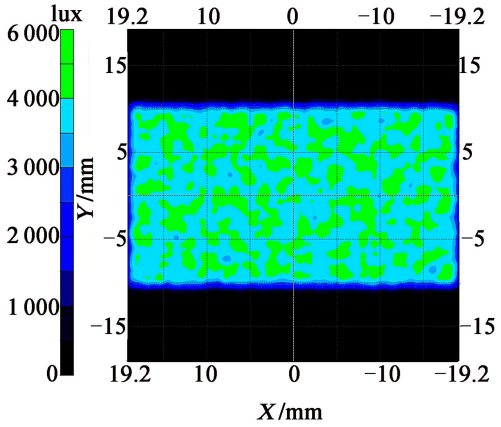


图 9　辐照均匀度最优解

4　结论

基于 Taguchi 方法对 Mini-LED 的芯片参数进行光学实验设计，利用 Tracepro 软件仿真，探究背光源对液晶层的照度均匀度影响，采用 ANOVA 分析了各因子对于品质特性的影响程度。实验结果最优参数为芯片发光半角为 30°、芯片尺寸为 0.1 mm×0.1 mm、背光源与液晶层的距离为 0.6，该组合的照度均匀度为 90.15%，其中背光源与液晶层的距离对照度均匀度的影响最大，占各影响因素的 82.88%。通过进一步调节背光源与液晶层之间的距离，得到照度均匀度最高为 91.17%。通过 Taguchi 方法和 Tracepro 仿真模拟对照度均匀度的分析，不仅可以得出背光源各参数对均匀度大小的影响程度，还快速设计出照度均匀度最佳的 Mini-LED 阵列排布，为解决此类问题提供了理论根据。

参考文献：

[1]　汪　勇. Mini LED 背光模组高亮显示研究[D]. 合肥：合肥工业大学，2019：7-12.
Wang Y. Research on high luminance for Mini-LED backlight unit[D]. Hefei：Hefei University of Technology，2019：7-12.

[2]　马丙戌，文尚胜，陈颖聪，等. 侧入式无导光板 LED 平板灯设计[J]. 红外与激光工程，2016，45(4)：174-181.
Ma B X，Wen S S，Chen Y C，et al. Design of edge-lighting LED flat panel light without light guide plate[J]. Infrared and Laser Engineering，2016，45(4)：174-181.

[3]　张泽成，王时英，吕　明. 导光板散射网点的布局与出光均匀性的研究[J]. 光学技术，2020，46(2)：198-203.

Zhang Z C, Wang S Y, Lv M. Study on the layout and light uniformity of the scattering dots of the light guide plate[J]. Optical Technique, 2020, 46(2): 198-203.

[4] 刘 沁, 刘启能. LED方形阵列的照度特性研究[J]. 半导体光电, 2015, 36(4): 560-564.
Liu Q, Liu Q N. lllumination characteristics of LED square array[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2015, 36(4): 560-564.

[5] 刘 沁, 刘启能. LED方形阵列光斑的发散特性研究[J]. 激光杂志, 2015, 36(4): 27-30.
Liu Q, Liu Q N. Divergence characteristics of light spot of LED square array[J]. Laser J., 2015, 36(4): 27-30.

[6] 张玉宝, 董 礼, 张国英. 不同发光半角的方形LED阵列发光特性研究[J]. 激光杂志, 2020, 41(12): 93-98.
Zhang Y B, Dong L, Zhang G Y. Luminous properties of square LED arrays with different luminous half angles[J]. Laser J., 2020, 41(12): 93-98.

[7] 刘 沁, 刘启能. 方形LED阵列光斑发散特性的幂函数拟合[J]. 光子学报, 2015, 44(4): 167-171.
Liu Q, Liu Q N. Power function fitting methods of light spot divergence characteristics of LED square array[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(4): 167-171.

[8] 赵芝璞, 季凌燕, 沈艳霞, 等. 基于PSO粒子群算法的LED照明系统光照均匀性研究[J]. 发光学报, 2013, 34(12): 1677-1682.
Zhao Z P, Ji L Y, Shen Y X, et al. Research of illumination uniformity for LED arrays based on PSO algorithm[J]. Chinese J. of Luminescence, 2013, 34(12): 1677-1682.

[9] 王加文, 苏宙平, 袁志军, 等. LED阵列模组化中的照度均匀性问题[J]. 光子学报, 2014, 43(8): 22-28.
Wang J W, Su Z P, Yuan Z J, et al. Study on uniformity of LED array illumination distribution on target plane[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(8): 22-28.

[10] Ivan Moreno, Avendano-Alejo Maximino, Tzonchev Rumen-I. Designing light-emitting diode arrays for uniform near-field irradiance[J]. Appl. Opt., 2006, 45(10): 2265-2272.

[11] 张玉宝, 董 礼, 张国英. 基于双芯片LED阵列辐照均匀的最大平坦照明距离探究[J]. 激光杂志, 2019, 40(2): 40-44.
Zhang Y B, Dong L, Zhang G Y. Research on uniform maximum flat lighting distance based on dual chip LED arrays [J]. Laser J., 2019, 40(2): 40-44.

[12] 周 明, 高 伟, 温 存. 一种RGB三原色背光实现广色域的技术[J]. 电子产品世界, 2021, 28(2): 38-40.
Zhou M, Gao W, Wen C. A technique of implementing wide color gamut based on RGB backlight [J]. The World of Electronics, 2021, 28(2): 38-40.

[13] 章锐华. 直下式LED背光模组关键技术研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2015: 27-30.
Zhang R H. Key technology research on direct-lit LED backlight module[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2015: 27-30.

[14] 史晨阳. 基于Taguchi方法的曲面底板LED阵列光学设计与优化[D]. 广州: 华南理工大学, 2016: 17-18.
Shi C Y. Optical design and optimization of curved surface LED array based on Taguchi method[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016: 17-18.

[15] 刘佳尧, 钱可元, 韩彦军, 等. 基于LED的直下式动态LCD背光源[J]. 液晶与显示, 2008 (4): 448-452.
Liu J Y, Qian K Y, Han Y J, et al. LED-based down-down dynamic LCD backlight[J]. Chinese J. of Liquid Crystals and Displays, 2008 (4): 448-452.

[16] 张 昕, 吴佩雯, 肖书平, 等. 显示驱动芯片原理及发展现状[J]. 液晶与显示, 2020, 35(11): 1156-1167.
Zhang X, Wu P W, Xiao S P, et al. Principle and development status of display driver chips[J]. Chinese J. of Liquid Crystals and Displays, 2020, 35(11): 1156-1167.

[17] Lin Chifeng, Wu Chihcheng, Yang Pohua, et al. Application of Taguchi method in light-emitting diode backlight design for wide color gamut displays[J]. J. of Display Technol., 2009, 5(8): 323-330.

作者简介:

童嘉俊(1997—),男,江苏南京人,硕士生,研究方向为半导体照明器件;

王海波(1963—),男,教授,研究生导师,主要研究方向为稀土发光材料、白光LED封装和制造。