

文章编号:1007-2780(2022)06-0680-07

Mini LED 显示光学性能分析

杨梅慧¹, 林伟瀚^{1*}, 于海¹, 胡文党², 谢沛川²

(1. 康佳集团股份有限公司, 广东 深圳 518057;

2. 深圳康佳电子科技有限公司, 广东 深圳 518107)

摘要:微间距 Mini LED 直显屏幕随着光出射角度变大, 将产生从正视白场到偏淡红色再到偏淡青色的角度色偏现象。通过测试及计算发现, 在 50°~60°视角位置出现色坐标拐点。通过光型分析, Mini LED 屏幕表面的色偏现象与 RGB 裸晶片的光型不匹配及光型左右不对称有关。同时由于 RGB 颜色在介质中的色散现象, 红光的逃逸角大于蓝绿光, 光线经过介质后红光光型发散程度强于蓝绿光。红绿蓝光强衰减程度的差异引起了出射光的角度色偏现象。

关键词: Mini LED; 色偏; 色散; 折射率

中图分类号: TN141; TN942.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/CJLCD.2022-0032

Optical performance analysis of Mini LED display

YANG Mei-hui¹, LIN Wei-han^{1*}, YU Hai¹, HU Wen-dang², XIE Pei-chuan²

(1. KONKA Group Co., Ltd., Shenzhen 518057, China;

2. Shenzhen KONKA Electronic Technology Co., Ltd., Shenzhen 518107, China)

Abstract: With the increase of the outgoing light angle of the micro spacing Mini LED direct display screen, there will be an angular color deviation from facing the white field to light red and then to light cyan. Through test and calculation, it is found that the inflection point of color coordinate appears at the position of 50°~60°. Through the light type analysis, the color deviation on the surface of Mini LED screen is related to the light type mismatch and left-right asymmetry of RGB die chip. Due to the dispersion of RGB color in the medium, the escape angle of red light is greater than that of blue and green light, and the divergence of red light is stronger than that of blue and green light after passing through the medium. The difference in the intensity attenuation of red, green and blue light causes the angular color deviation of the outgoing light.

Key words: Mini LED; color deviation; dispersion; refractive index

1 引言

目前液晶显示(LCD)在市场上仍然占据主

导位置,有机电致发光显示(OLED)占据了部分
高端市场。新型显示领域主要的技术系统有量
子点电致发光显示(QLED)和微发光二极管

收稿日期:2022-01-28;修订日期:2022-03-15.

基金项目:深圳市科技创新委员会资助项目(No. JSGG20201201100401003)

Supported by Shenzhen Science and Technology Innovation Commission(No. JSGG20201201100401003)

*通信联系人, E-mail: linweiha@konka.com

(Micro LED)显示。Micro LED显示利用微米尺寸(一般小于 $50\text{ }\mu\text{m}$)^[1]无机LED器件作为发光像素,来实现主动发光矩阵式显示。随着第三代显示的需求推动和技术发展, Micro LED由于其优异的电流饱和密度^[2]、更高的量子效率以及高可靠性,已经成为目前技术的热点,在 Micro LED的器件设计制造和全彩显示解决方案^[3],以及 VLC 通讯^[4-5]、全集成多功能化新型显示器件^[6]等方面被广泛研究。根据现代 TRIZ 理论的技术系统 S 曲线进化趋势, QLED 和 Micro LED 目前处于婴儿期^[7]。作为 Micro LED 前驱的次微发光二极管(Mini LED),器件尺寸为 $50\sim 200\text{ }\mu\text{m}$ ^[8],由于尺寸小,使用板上固晶(COB)工艺可以将屏幕像素间距做到 $P1.25\text{ mm}$ 以下,形成微间距 Mini LED 显示产品。Mini LED 器件也可以应用在液晶显示背光灯板上,通过精细化的分区实现局域动态调光来实现高亮度、高动态对比度的优秀画质^[9-10]。Mini LED 显示目前产业已经成熟,市场规模逐年增加,并逐渐抢占常规商业显示的市场。Mini LED 微间距显示产品具有高 PPI、高亮度、高对比度等特性。Mini LED 微间距拼接显示产品随着拼接技术和驱动技术的优化,将产生 4K/8K 户内影院产品,有望打开家电消费市场。

Mini LED 主动式显示技术使用红绿蓝倒装的 Mini LED 芯片器件,使用固晶的方式贴在印制电路板(PCB)或者玻璃驱动基板上面(COB 或 COG)。相较于使用常规的支架封装的 LED 显示屏, COB 产品因为没有 LED 封装支架的反光杯,像素之间容易发生光串扰,在大角度观看 Mini LED 显示屏幕时容易出现色偏现象。

2 实 验

本文采用尺寸 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的 $4\text{ mil}\times 8\text{ mil}$ Mini LED 芯片,通过 COB 固晶、表面封胶工艺,制作红绿蓝全彩显示的 Mini LED 灯板。表面封胶材料为混合碳粉的有机硅改性环氧树脂,封胶厚度为 $250\text{ }\mu\text{m}$ 。样品 1 固晶后表面膜压 $50\text{ }\mu\text{m}$ 厚的黑色膜层,黑胶填缝于 Mini LED 芯片缝隙之间,等离子清洗芯片表面残胶后,再膜压一层 $200\text{ }\mu\text{m}$ 厚度的半透膜,表面为光面。样品 2 固晶后注塑模压 40% 透过率的改性环氧树脂,封胶厚度

$250\text{ }\mu\text{m}$,胶体表面为雾面,样品如图 1 所示。屏幕像素间距 P 为 0.68 mm 。Mini LED 芯片器件长边方向朝向水平方向。



图1 Mini LED灯板样品

Fig. 1 Mini LED light board

样品 1 和样品 2 采用 CS2000 进行亮度和色坐标光学测试, CS2000 镜头光学角度为 1° 。将屏幕按角度旋转, 旋转测试角度为 $-90^\circ\sim 90^\circ$, 测试角度间隔为 5° , 使用 CS2000 测试样品在不同角度条件下的色坐标值及亮度值。结合主观观测, 得出显示屏幕的色偏现象及数值。测试 Mini LED RGB 裸晶芯片长边方向光学数据, 将其与屏幕角度色坐标变化及色偏现象进行对比, 分析屏幕色偏原因。

3 结果与讨论

3.1 实验结果

通过主观观测, 正视屏幕, 视线与屏幕法线呈 0° 时为标准白场, 随着角度的增加, 屏幕右角度方向先呈现淡青色再变为浅红色再变为淡青色, 左方向则呈现浅红色现象。使用 CS2000 将屏幕按角度旋转进行亮度色度测试。

表 1 为样品 1 和样品 2 在不同角度下测试的色坐标(CIE1931)数据, 图 2 为依据表 1 绘制的屏幕不同角度下的色坐标分布图, 其中横坐标为 CIE 1931 颜色坐标的 x 坐标, 纵坐标为颜色坐标的 y 坐标。如图 2, 样品 1 在右方向色坐标 60° 处呈现拐点, 依据表 1 数据, $0^\circ\sim 60^\circ$ 视角时 x 值增加 $+0.0127$, y 值增加 $+0.0018$, x 值增加明显, 即红色光强增加明显。 $60^\circ\sim 85^\circ$ 范围 x 值基本不再增加, y 值增加 0.0104 , 即此范围红颜色光强降幅明显。样品 1 左方向拐点依然在 60° , $0^\circ\sim 60^\circ$

表 1 样品不同角度色坐标值

Tab. 1 Color coordinate values of samples at different angles

样品 1 色坐标分布						样品 2 色坐标分布					
左边 角度/(°)	<i>x</i>	<i>y</i>	右边 角度/(°)	<i>x</i>	<i>y</i>	左边 角度/(°)	<i>x</i>	<i>y</i>	右边 角度/(°)	<i>x</i>	<i>y</i>
0	0.318 8	0.309 4	0	0.318 8	0.309 4	0	0.303 5	0.299 1	0	0.303 5	0.299 1
−5	0.319 7	0.309 4	5	0.316 8	0.310 3	−5	0.305	0.299 5	5	0.303 9	0.299 6
−10	0.322 1	0.309 6	10	0.317 2	0.310 4	−10	0.307	0.299 6	10	0.302 9	0.299 9
−15	0.325 3	0.310 1	15	0.317 7	0.312 1	−15	0.309 4	0.299 9	15	0.303	0.300 8
−20	0.328 1	0.311 1	20	0.318	0.312 4	−20	0.312 4	0.300 3	20	0.303 9	0.301 2
−25	0.329 8	0.311 3	25	0.319 4	0.312 9	−25	0.315 4	0.300 8	25	0.305 6	0.302 1
−30	0.332 3	0.311 9	30	0.321 6	0.313 1	−30	0.318 3	0.301 3	30	0.306 9	0.302 8
−35	0.336 3	0.312 8	35	0.324 2	0.312 8	−35	0.320 7	0.301 8	35	0.309 1	0.302 9
−40	0.338 7	0.312 7	40	0.327 1	0.311 7	−40	0.322 2	0.302	40	0.310 6	0.303
−45	0.340 3	0.312 2	45	0.329 7	0.311 4	−45	0.322 7	0.302 2	45	0.314	0.302 6
−50	0.340 7	0.312 6	50	0.330 8	0.310 9	−50	0.323 3	0.302 4	50	0.315 4	0.302 3
−55	0.341 9	0.312 8	55	0.331	0.310 8	−55	0.322 8	0.302 2	55	0.315 6	0.302 2
−60	0.341 9	0.313 1	60	0.331 5	0.311 2	−60	0.321 7	0.302 8	60	0.315 3	0.302 3
−65	0.341 7	0.313 6	65	0.330 9	0.311 9	−65	0.321	0.303 3	65	0.312 9	0.302 9
−70	0.340 1	0.314 6	70	0.329 4	0.312 8	−70	0.318 2	0.303 9	70	0.31	0.303 8
−75	0.339 3	0.315 3	75	0.329 1	0.314 7	−75	0.313 6	0.304 8	75	0.305 6	0.305 1
−80	0.337 8	0.316 1	80	0.329 7	0.316 5	−80	0.308 2	0.306 2	80	0.300 2	0.307
−85	0.332 8	0.318 2	85	0.331	0.321 6	−85	0.294 9	0.308 6	85	0.287 3	0.309 5

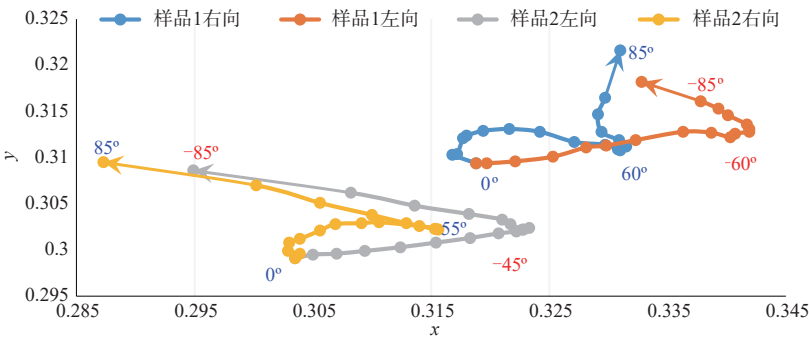


图 2 样品在不同角度的色坐标分布

Fig. 2 Color coordinate distribution of samples at different angles

时 x 值增加 +0.023 1, y 值增加 +0.003 7, x 值增加比右方向明显, 即左边角度偏红现象比右边明显。60°~85° 范围 x 值变化为 −0.009, y 值增加 0.005 1, 大角度视角出现偏淡青色现象。

如图 2 所示, 样品 2 色坐标视角变化趋势与样品 1 相似。其中右向角度色坐标趋势拐点在 55°, 0°~55° 时 x 值增加 +0.012 1, y 值增加 +0.003 1, 55°~85° 范围时 x 值变化 −0.028 3, y 值增加 0.007 3, 即 55° 以后白场颜色逐渐偏青。左向角度色坐标

趋势拐点在 50°, 拐点角度比右方向角度小, 0°~50° 时 x 值增加 +0.019 8, y 值增加 +0.003 3, 左方向红色光强比右方向高。50°~85° 范围 x 值变化 −0.028 4, y 值变化 −0.006 2, 即 50° 以后颜色逐渐偏蓝。

将样品不同角度测试的亮度数据进行归一化处理后制成光型分布图。两块样品测试的亮度光型分布图如图 3 所示。屏幕样品 1 的 RGB 颜色场光型形状不匹配而且左右不对称。GB 颜

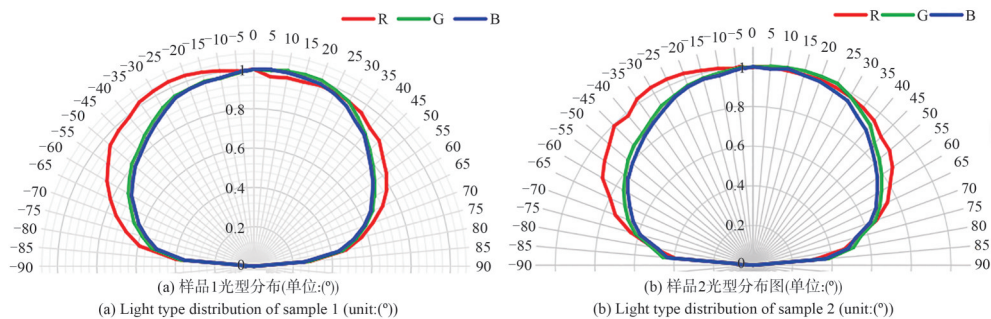


图3 样品光型分布

Fig. 3 Light type distribution of samples

色场光型图形状基本重合,红颜色场右方向大于 30° 角后形状突出于蓝绿,左方向 -5° 以后红颜色场形状突出于蓝绿。即随着灯板光线出射角度的增大,蓝绿芯片亮度衰减趋势大于红光的衰减趋势。其中,红颜色场左边方向视角亮度大于右边方向亮度,而蓝绿光颜色场则右边方向视角亮度大于左边方向亮度。样品2的光型图与样品1的形状和趋势相同。光型的不对称与前述左右方向色坐标的不对称对应。

将Mini LED RGB芯片沿着长边方向,测试 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 之间的光强分布值,将3种芯片的角度光强值归一化后描绘芯片的光型分布图,结果如图4所示。

如图3和图4,裸晶芯片的光型分布与屏幕的光型分布趋势类似,均为左右不对称,但具体形状不一样,尤其是红光,裸晶芯片的收拢程度强于屏幕光型。

3.2 结果分析

3.2.1 色坐标拐点分析

Mini LED直显屏幕出现视角色偏现象有两

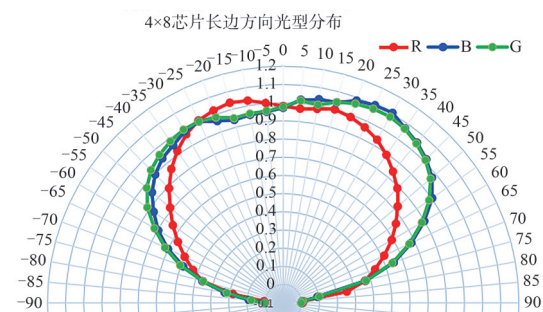


图4 Mini LED RGB裸晶芯片长边方向光型分布图(单位:°)

Fig. 4 Light distribution along the long side of Mini LED RGB die chip (unit:°)

种情况,现象1是随视角变化对应颜色发生变化,即视角色偏且变色。现象2,视角色偏现象左右两边变化不一样。归一化后RGB光型视角亮度幅值变化程度数据如图5。

图5为样品的红光与绿光、红光与蓝光的视角光强幅度变化差值。样品1幅度变化差异值在 60° 达到峰值,样品2在 50° 达到峰值,这与色坐标拐点位置吻合。对于样品1而言,在出射光

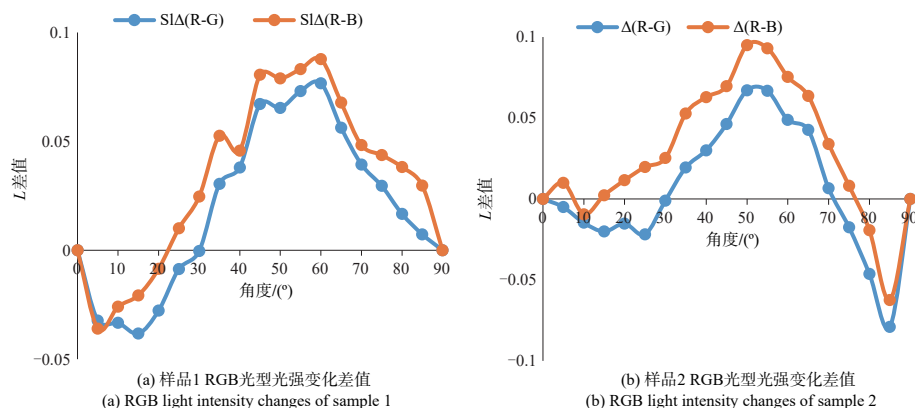


图5 RGB光型光强变化差值

Fig. 5 Light intensity changes of RGB light type

0°~60°范围,随着出射角度变大,红光的光强衰减程度弱于蓝绿光,出射光大于60°之后,红光的光强衰减程度强于蓝绿光。

样品1屏幕在60°~85°之间的大角度范围红光强度占比迅速减小,一是因为裸晶片本身大角度光强弱,二是因为蓝绿光散射效果强于红光,改性环氧树脂介质中存在微小碳粉颗粒及气泡,在此大角度低光强条件下散射效果要强于折反射效果。样品2的色坐标拐点角度小于样品1的色坐标拐点角度,是因为样品1的封胶表面是光面,样品2的封胶表面是雾面,雾面改变了界面的光线逃逸角方向,即光提取效率增加。

随着红绿蓝光强衰减程度比例变化,色坐标对应发生了突变出现拐点。屏幕视角光强衰减程度的变化,估计与RGB裸晶片的发光光型及RGB色散程度不同有关。

3.2.2 光型变化分析

如图4,裸芯片RGB光型形状不匹配,同时左右不对称。R光型比GB光型左右两边对称。GB光型一致,角度光强对称性较差。R光型左方向角度强度稍强于右方向,而GB右方向角度强度高于左方向。以上两点与Mini LED屏幕的光型不对称趋势一致。说明屏幕角度色坐标变化和色偏与Mini LED裸晶芯片RGB光型不匹配相关。

GB芯片光型对称性较差则由芯片的结构引起。Mini LED芯片为倒装芯片,出光面为蓝宝石衬底。裸晶芯片及灯板的光型测试均为沿着芯片的长边方向从左到右,即从芯片的N极到P极转动角度测试。LED芯片制程工艺中N极位置台阶偏低,发光反应层将被蚀刻掉。其中,GaN型芯片的PN两极分布在长边方向左右两侧的角部位置,因此GB芯片的N极方向的光强会降低,光型左右不对称。而红光R芯片的PN两极分布在长边方向左右两侧的居中位置,因此相对于GB来说R光型要对称。4×8 R芯片P极方向的电流阻挡层(CBL)及电极PAD面积占比比GB大,吸光程度较强,因此R芯片右边P极方向的光型强度比左边稍低。

如图3和图4,封胶后的屏幕灯板光型发散程度均高于裸晶光型发散程度,红光R的发散程度最大,即封胶后光逃逸角大于裸晶状态的光逃逸角。这可能与封胶前后折射率变化有关。

Mini LED芯片出光面介质为蓝宝石,折射率为1.768^[11]。Mini LED灯板用的环氧树脂为有机硅改性环氧树脂,折射率约为1.51^[12-14],空气折射率约为1,以上折射率均据于589.3 nm标准钠黄光测试数据。芯片反应层发射的光从蓝宝石衬底逃逸。封胶后光线在蓝宝石衬底与环氧树脂界面发生折射和全反射,折射出的光线进入环氧树脂层,光线到达环氧树脂与空气的界面时再次发生折射和全反射。

$$n_1 \sin i = n_2 \sin r, \quad (1)$$

$$\sin i_c = \frac{n_{疏}}{n_{密}}. \quad (2)$$

依据折射定律公式(1)和全反射公式(2),算出Mini LED裸芯片的光线逃逸角为34.5°,封胶后的Mini LED灯板中芯片的光线进入胶体的逃逸角为59.1°,芯片光取出率增加,如图6,光线到达环氧树脂与空气界面逃逸角为41.3°,出射光线进行了发散。环氧树脂折射率介于蓝宝石衬底及空气折射率之间,由于界面处折射率发生改变,增加了界面处的耦合光效,使器件的侧方向上的光通量增加^[15],因此灯板封胶后出射光型会发散。其中树脂层大于41.3°逃逸角的光线反射回蓝宝石界面上,蓝宝石表面进行PSS(Patterned Sapphire Substrate)处理^[16-17],同时环氧树脂表面进行了雾面处理,用来破坏界面全反射条件从而增加光取出率,并增加光型发散程度。

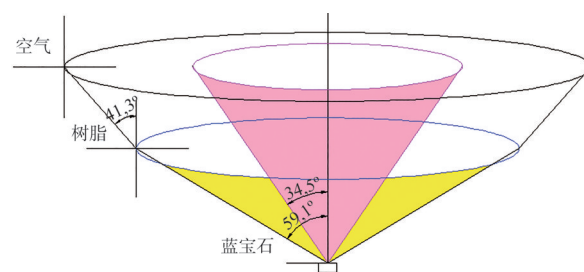


图6 Mini LED芯片及灯板逃逸角

Fig. 6 Mini LED chip and light board escape angle

如图4,Mini LED裸芯片R光型收拢程度比GB强;如图3,封胶后的灯板R光型发散程度却高于GB的角度发散程度。这可能与不同波长的光线在同一介质中折反射角度不一致有关,即色散现象。

$$n(\lambda)=A+\frac{B}{\lambda^2}.$$

(3)

依据柯西(A. L. Cauchy)色散经验公式(3)^[18],参考与封装胶体折射率相近的BK7玻璃500 nm 折射率1.520 942^[11],计算出改性环氧树脂柯西

公式常数A为1.481 88,B为9.77E+03。蓝宝石衬底RGB折射率如表2所示^[11]。RGB Mini LED芯片的波长分别为630,530,470 nm,算出3种颜色光在介质中的折射率及界面逃逸角数据如表2所示。

表 2 RGB 颜色介质折射率及表面逃逸角

Tab. 2 Refractive index and surface escape angle of RGB color

颜色	蓝宝石衬底折射率	改性环氧树脂折射率	衬底与树脂界面逃逸角/(°)	树脂与空气界面逃逸角/(°)
R	1.766	1.506	58.5	41.6
G	1.772	1.517	58.9	41.3
B	1.777	1.526	59.2	40.9

如表2中计算的逃逸角数据,RGB在蓝宝石衬底与树脂界面逃逸角均约59°,已包含裸晶片大部分高能量出射光线,红光R的聚拢程度比GB强。而在树脂与空气界面,红光的逃逸角大于蓝绿光逃逸角,因此红光裸芯片发出的光为聚拢光型,但是灯板封装后红光的光型转变为发散光型,且发散程度强于蓝绿光。

4 结 论

Mini LED 直显屏幕随着出射角度变大,将

产生从正视白场到偏淡红色再到偏淡青色的角度色偏现象。通过测试及计算发现,在50°~60°视角位置出现色坐标拐点。拐点前面角度x坐标明显增加,y坐标基本不变,大于拐点的角度x坐标停滞或减小,y坐标增加明显。通过光型分析,Mini LED屏幕表面的色偏现象与RGB裸晶片的光型不匹配及光型左右不对称有关,同时由于RGB颜色在介质中的色散现象,红光在树脂界面的逃逸角大于蓝绿光,光线经过介质后红光光型发散程度强于蓝绿光,红绿蓝光强衰减程度的差异引起了出射光角度色偏现象。

参 考 文 献:

[1] 季洪雷,张萍萍,陈乃军,等. Micro-LED显示的发展现状与技术挑战[J]. 液晶与显示,2021,36(8):1101-1112.
JI H L, ZHANG P P, CHEN N J, *et al.* Micro-LED display: recent progress and future challenges [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(8): 1101-1112. (in Chinese)

[2] TIAN C, GUO S X, LIANG J Q, *et al.* Effects of unit size on current density and illuminance of micro-LED-array [J]. *Optoelectronics Letters*, 2017, 13(2): 84-89.

[3] LIU Z J, LIN C H, HYUN B R, *et al.* Micro-light-emitting diodes with quantum dots in display technology [J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9(1): 83.

[4] ISLIM M S, FERREIRA R X, HE X Y, *et al.* Towards 10 Gb/s orthogonal frequency division multiplexing-based visible light communication using a GaN violet micro-LED [J]. *Photonics Research*, 2017, 5(2): A35-A43.

[5] 田朋飞,顾而丹,刘冉,等. 氮化镓基Micro-LED的研究现状[J]. 光源与照明,2018(1):1-4.
TIAN P F, GU E D, LIU R, *et al.* Research status of gallium nitride based Micro-LED [J]. *Light Source and Lighting*, 2018(1): 1-4. (in Chinese)

[6] LIU Z J, ZHANG K, LIU Y B, *et al.* Fully multi-functional GaN-based micro-LEDs for 2500 PPI micro-displays, temperature sensing, light energy harvesting, and light detection [C]//2018 *IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)*. San Francisco: IEEE, 2018: 38.1.1-38.1.4.

[7] 杨斌,王世荣. 从技术系统进化趋势研判主要显示技术方向的演进[J]. 液晶与显示,2021,36(8):1144-1150.
YANG B, WANG S R. Development judgment of the main display techniques based on the trends of engineering system evolution [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(8): 1144-1150. (in Chinese)

- [8] VIREY E, BOUHAMRI Z. MicroLED displays-market, industry and technology trends 2020 [R]. Yole, 2020: 15.
- [9] 郭举, 申琼鑫, 江宗钊, 等. Mini-LED 背光区域调光单元的光学特性研究[J]. 液晶与显示, 2021, 36(7): 939-946.
GUO J, SHEN Q X, JIANG Z Z, *et al.* Optical performance of local dimming backlight unit based on Mini-LED sources [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(7): 939-946. (in Chinese)
- [10] CHEN E G, GUO J, JIANG Z Z, *et al.* Edge/direct-lit hybrid mini-LED backlight with U-grooved light guiding plates for local dimming [J]. *Optics Express*, 2021, 29(8): 12179-12194.
- [11] WAKAKI M, KUDO K, SHIBUYA T. 光学材料手册[M]. 周海亮, 程云芳, 译. 北京: 化学工业出版社, 2010: 328-329.
WAKAKI M, KUDO K, SHIBUYA T. *Physical Properties and Data of Optical Materials* [M]. ZHOU H X, CHENG Y F, trans. Beijing: Chemical Industry Press, 2010: 328-329. (in Japanese)
- [12] 刘涛, 马凤国. LED 封装用有机硅改性环氧树脂的研究进展[J]. 有机硅材料, 2014, 28(6): 473-478.
LIU T, MA F G. Application and development of polysiloxane softener in textile finishing [J]. *Silicone Material*, 2014, 28(6): 473-478. (in Chinese)
- [13] 刘瑞霞, 杨欣, 张瑛, 等. LED 封装用有机硅环氧树脂研究进展[J]. 粘接, 2014, 35(7): 41-45.
LIU R X, YANG X, ZHANG Y, *et al.* Advances in research of silicone-epoxy resins for LED package [J]. *Adhesion*, 2014, 35(7): 41-45. (in Chinese)
- [14] 陈绵锋. LED 封装用聚硅氧烷改性环氧树脂的制备及其性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017: 15-16.
CHEN M F. Study on the preparation and performance of polysiloxane-modified epoxy resin for LED encapsulation [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017: 15-16. (in Chinese)
- [15] 王磊, 罗翔, 常佛青, 等. 折射率匹配对绿光发光二极管微显示光学性能影响[J]. 液晶与显示, 2020, 35(9): 900-907.
WANG L, LUO X, CHANG F Q, *et al.* Effect of refractive index matching on optical performance of green LED microdisplay [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(9): 900-907. (in Chinese)
- [16] 佟玉莹, 杨国锋, 赵建利, 等. 图形化蓝宝石衬底结构对 GaN 基 LED 发光性能的影响[J]. 光电子·激光, 2015, 26(5): 829-834.
TONG Y Y, YANG G F, ZHAO J L, *et al.* Effects of patterned sapphire substrate morphology on the emission properties of GaN-based LEDs [J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2015, 26(5): 829-834. (in Chinese)
- [17] 车振, 张军, 余新宇, 等. GaN 基 LED 倒装芯片蓝宝石衬底半球型图形优化设计[J]. 应用光学, 2015, 36(4): 606-611.
CHE Z, ZHANG J, YU X Y, *et al.* Optimized double-sided hemispherical pattern design on patterned sapphire substrate for flip-chip GaN-based LED [J]. *Journal of Applied Optics*, 2015, 36(4): 606-611. (in Chinese)
- [18] 陈熙谋. 光学[M]. 2 版. 北京: 北京大学出版社, 2011: 196-200.
CHEN X M. *Optics* [M]. 2nd ed. Beijing: Peking University Press, 2011: 196-200. (in Chinese)

作者简介:



杨梅慧(1982—), 女, 广东梅州人, 硕士, 高级工程师, 2008 年于太原科技大学获得硕士学位, 主要从事 Micro LED、Mini LED 新型显示技术研究及平板电视机背光模组开发工作。
E-mail: ymhuifei@163.com



林伟瀚(1984—), 男, 广东深圳人, 学士, 高级工程师, 2007 年于华南理工大学获得学士学位, 主要从事新型显示技术的开发研究工作。E-mail: linweihan@konka.com