

基于量子点膜色转换的 Micro LED 全彩显示 像素点仿真研究*

吴大磊¹, 夏天文¹, 陈绍杭¹, 杜佳怡¹, 张永爱^{1,2}, 周雄图^{1,2},
郭太良^{1,2}, 严群^{1,2,3}, 孙捷^{1,2,3**}

(1. 福州大学 物理与信息工程学院, 福州 350108; 2. 中国福建光电信息科学与技术创新实验室, 福州 350108;
3. 晋江市博感电子科技有限公司, 福建 泉州 362200)

摘要: 从仿真角度出发, 分析设计了基于量子点膜色转换方案像素点的整体结构模型, 首先构建了蓝光 Micro LED (micro light-emitting diode, Micro LED) 结构模型, 研究了表面粗化和二维光栅两种提升 Micro LED 光提取效率 (light extraction efficiency, LEE) 的表面微结构; 然后分别分析了有无该结构的蓝光 Micro LED 与侧壁挡光介质结合组成蓝色子像素点的 LEE 和光强分布随侧壁倾角变化的趋势; 接着优化了量子点膜的模型参数, 并分析了有无表面微结构的蓝光 Micro LED 对红绿子像素点光转换效率和光强分布的影响; 最后对上述不同结构全彩像素点整体的色偏性能做了对比研究。仿真结果表明, 具备表面粗化蓝光 Micro LED 和侧壁反射型挡光介质的像素点在 $0^\circ \sim 50^\circ$ 倾角下均可获得较大的正面 LEE 和低于 0.02 的色偏, 相比其他结构更适合于量子点膜色转换方案。

关键词: 微缩矩阵化发光二极管; 全彩显示; 量子点膜; 像素点; 色偏

中图分类号: TN27 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-488X(2023)03-0218-08

Simulation of Full-color Micro LED Display Pixels Based on Quantum Dot Film Color Conversion

WU Dalei, XIA Tianwen, CHEN Shaohang, DU Jiayi, ZHANG Yongai, ZHOU Xiongtu,
GUO Tailiang, YAN Qun, SUN Jie

(1. College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, CHN; 2. Fujian Science & Technology Innovation Laboratory for Optoelectronic Information of China, Fuzhou 350108, CHN; 3. Rich Sense Electronics Technology Co., Ltd., Quanzhou Fujian 362200, CHN)

Abstract: The overall structure of the pixel points based on the quantum-dot color conversion film (QDCCF) was analyzed and designed using the simulation method. Firstly, the structure model of blue light micro light-emitting diode (Micro LED) was constructed. Besides, the surface micro-

收稿日期: 2023-01-06

* **基金项目:** 国家重点研发计划 (2021YFB3600104); 福建省科技厅项目 (2021HZ0114, 2021J01583, 2021L3004); 中国福建光电信息科学与技术创新实验室项目 (2021ZZ122, 2020ZZ110)

作者简介: 吴大磊 (1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为 Micro LED 全彩显示光学仿真; (E-mail: 1732545575@qq.com)
严群 (1965—), 男, 博导, 现从事基于 Micro LED 的高度集成半导体信息显示和交互式富媒体领域的研发;
孙捷 (1977—), 男, 博导, 主要研究方向为氮化镓 Micro LED 集成信息显示、二维半导体材料生长及其在纳米电子学中应用的研究。(E-mail: jie.sun@fzu.edu.cn)

** 通讯作者

structures, which included surface roughening and 2-D grating, were studied to enhance the light extraction efficiency (LEE) of the Micro LED. Moreover, the LEE and light intensity distribution of blue sub-pixels of the blue Micro LED with or without surface microstructure and the side-wall light-blocking medium under different side-wall angles were analyzed separately. Then, the parameters of the QDCCF were optimized, and the LEE and light intensity distribution of the red and green sub-pixels were analyzed in the Micro LED with different structures. Finally, the color shift of full-color pixels with different structures were compared and analyzed. The simulation results showed that the pixels with surface-roughening blue Micro LED and side-wall reflective light-blocking media could obtain a larger frontal LEE and a color shift of less than 0.02 at the angle of $0^\circ \sim 50^\circ$, which was more suitable for the QDCCF scheme compared with other structures.

Key words: Micro LED; full-color display; quantum dot film; pixel point; color shift

引言

Micro LED (micro light-emitting diode) 显示是将尺寸在 $1 \sim 50 \mu\text{m}$ 之间的发光二极管 (light-emitting diode) 作为发光像素的技术, Micro LED 具有发光亮度高、使用寿命长、响应速度快等特点, 并且可以广泛应用于手机、电视、可穿戴产品等领域, 因此被认为是未来最具发展潜力的显示技术之一^[1-4]。但如今 Micro LED 显示仍没有实现大规模的商业化生产, 其关键在于存在许多亟待解决的难题, 如巨量转移^[5], 全彩化显示^[6], 外延生长^[7], 驱动方式等^[8], 而文中主要分析如何解决全彩化显示方面的问题。目前, 在 Micro LED 全彩化显示方面, 最直接的方法就是通过红绿蓝三种 Micro LED 组成像素点来实现全彩化显示, 但该方案需要将数目众多、不同颜色的 Micro LED 转移到同一驱动背板上, 在转移过程中保证抓取和释放的良率是一个巨大的挑战^[9]。此外, 红绿蓝 Micro LED 开启电压不一致给驱动电路的设计带来了困难^[10]。量子点膜色转换方案可采用喷墨打印和旋涂的方法将红绿色量子点膜放置在蓝光 Micro LED 上方, 通过蓝光 Micro LED 激发红绿色量子点膜获得红绿光从而实现全彩显示, 具有工艺简单、可实现性高等特点, 因此被认为是实现 Micro LED 全彩化显示的最优方案之一, 也是文章研究的重点^[11-12]。

通过量子点膜色转换方案实现 Micro LED 全彩显示的像素点基本结构包括蓝光 Micro LED、红绿量子点膜、将子像素点隔离开的侧壁挡光介质。利用上述基本结构组成像素点实现全彩显示时面临以下问题: 制备蓝光 Micro LED 的 GaN 折射率与

空气存在较大的折射率差 (约为 2.5:1), 会导致出光界面处严重的全反射, 只有在约为 23° 内光提取锥的光线才能出射到空气中, 绝大部分光被禁锢在 Micro LED 内部经过多次反射直至被 Micro LED 各叠层材料和金属电极吸收, 从而导致较低的光提取效率 (light extraction efficiency, LEE); 红绿量子点虽具有较高的量子产率, 但制备成红绿量子点膜会面临较低光转换效率的问题; 侧壁挡光介质虽然能避免光学串扰, 但牺牲了侧壁出光, 从而导致光效降低。为了解决这些问题, 学术界开展了相关研究: 在提高蓝光 Micro LED 的 LEE 方面, 使 Micro LED 具备一定倾角或对 Micro LED 出光面进行表面粗化以破坏全反射来提升 LEE, 以及在 Micro LED 出光面制备二维光栅以利用二维光栅的衍射效应将逃逸锥外的光线带到逃逸锥内来提升 LEE^[13-15]; 在提高红绿量子点膜光转换效率方面, 在量子点膜层中放置散射粒子以增加蓝光在量子膜中的散射概率, 使蓝光接触到量子点的概率增加从而提高蓝光的转化效率^[16]; 针对挡光介质造成光效降低问题, 则通过改变挡光介质结构和材料来提升出光效率^[17]。然而, 上述这些研究只针对像素点的单一基本结构进行优化, 无法呈现出像素点整体的显示性能, 目前对像素点的整体结构设计和显示性能的分析还存在不足, 采用仿真方法可对比分析上述不同基本结构组成像素点时的整体显示性能, 给出最优的像素点结构设计, 在量子点膜色转换方案中实现 Micro LED 全彩显示至关重要。

针对目前量子点膜色转换方案实现 Micro LED 全彩显示的像素点缺少整体的结构设计和显示性能分析的问题, 文章基于射线追迹法, 分析设计了

具备低色偏、高光效的像素点结构模型。首先,构建倒装蓝光 Micro LED 初始叠层结构模型,研究了表面粗化和二维光栅两种提升 Micro LED 的 LEE 表面微结构的方法。然后,分析了有无表面微结构的蓝光 Micro LED 在不同侧壁挡光介质结构下的 LEE 与和光强分布随侧壁倾角变化的趋势,为蓝色子像素点的结构设计提供了参考意见。接着,分析不同量子点和散射粒子的质量分数和量子点膜的厚度对蓝光转换效率和蓝光透过率的影响,获得了高转换效率和低蓝光透过率的量子点膜参数,并分析了有无表面微结构的蓝光 Micro LED 对红绿子像素点光型和转换效率的影响。最后,探究了有无表面微结构 Micro LED 的像素点的色域、色偏值、红绿蓝光型匹配度,得到了符合量子点膜色转换方案的结构模型,对基于量子点膜色转换方案的 Micro LED 显示像素点的结构设计具有一定的指导作用。

1 蓝光 Micro LED 模型搭建

图 1 展示了倒装 Micro LED 模型结构示意图,在 Micro LED 建模方面,考虑到 Micro LED 多量子阱(multiple quantum well, MQW)折射率与其他叠层结构折射率相差较大的问题,需单独设置它的材料属性,而其余各叠层结构因折射率相差较小可以设置为统一的材料属性。此外,从仿真方面对 Micro LED 叠层结构进行简化^[15]。仿真模型中蓝光 Micro LED 尺寸为 $30\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m}$,包含厚度 5200 nm 的 n-GaN 层、厚度 200 nm 的 MQW、以及厚度 100 nm 的 p-GaN 层、金属电极反射率为 90%。模拟过程中也考虑了各叠层材料在可见光波段(380~780 nm)范围内的折射率^[18]。文中 Micro LED 模型和以及后续的像素点模型均在射线光学仿真软件中搭建,所采用的方法为射线追迹法。射

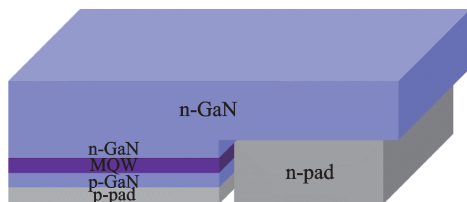


图 1 基于射线追迹法构建的倒装 Micro LED 模型结构示意图

Fig.1 The structure of the flip-flop Micro LED model based on ray tracing method

线追迹法将光分解为多条光线,依照几何光学的原理分析光线在 Micro LED 内部从 MQW 经各层叠层结构直至出射的过程,在 Micro LED 的 LEE 和色彩分析以及光强分布上高度契合 Micro LED 的光学实际情况,更适用于大规模阵列化的 Micro LED 像素点设计分析^[18-19]。

图 2 是具备表面粗化结构的 Micro LED 示意图。粗化表面的制备技术是采用化学方法腐蚀出光面 n-GaN 的表面结构,其最大的特点是工艺简单便于实现。粗化模型的形貌数据通过使用原子力显微镜扫描腐蚀后的 n-GaN 表面结构,然后依照扫描数据完成 n-GaN 层的建模。经实验探究,粗化程度越高 Micro LED 的 LEE 越大,选取实测中粗化程度较高的样品作为扫描对象来完成粗化表面结构建模。

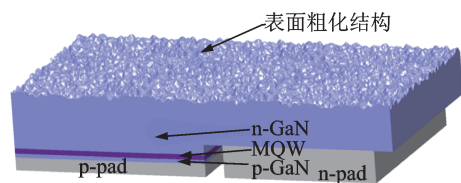


图 2 具备表面粗化结构的 Micro LED 模型结构示意图
Fig.2 The structure of Micro LED with surface roughening

图 3 为二维光栅的示意图。二维光栅的周期、高度、占空比影响着光线透射率,进而影响出光效率。通过对以上参数的扫描分析,当二维光栅具备 0.915 的底部占空比、0.105 的顶部占空比、 $1.09\ \mu\text{m}$ 的高度、 $0.61\ \mu\text{m}$ 的周期时可获得较大透射率。考虑到在射线光学中无法仿真二维光栅的衍射现象,文中采用严格耦合波算法(RCWA)将 n-GaN 表面的二维光栅结构的衍射特性转化为向双向散射分布函数(BSDF),然后将二维光栅的 BSDF 转换为表面光学属性,再赋予到 Micro LED 的 n-GaN 出光面,这样就可以完成具备二维光栅衍射特性的 Micro LED 建模。

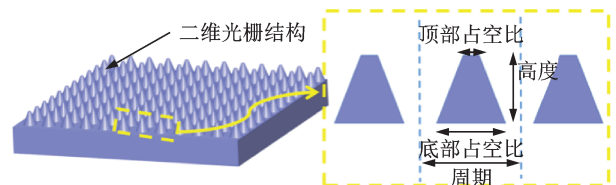


图 3 二维光栅模型结构示意图
Fig.3 The structure of the 2-D grating

2 像素点模型结构与显示性能分析

2.1 蓝色子像素点结构分析

随着LED尺寸减小,侧壁出光面积占总出光面积比值逐渐增大,侧壁出光占比也逐渐增大,这一现象在Micro LED中更加明显^[20]。虽然侧壁出光可以给Micro LED带来总LEE的增强,却不适用于量子点膜色转换方案,因为侧壁出光会激发相邻子像素点的量子点膜而造成严重的光学串扰。对于蓝色子像素点,更关注的是像素点的正面出光,因此分析设计出高效正面出光的蓝色子像素点极为

关键。根据当前Micro LED光效提升方案,设计了三种不同结构的蓝色子像素点如图4(a)~图4(c)所示,三种蓝色子像素点中的Micro LED出光面结构分别是无修改、表面粗化、二维光栅,其中蓝色子像素点侧壁挡光介质的表面属性具有全吸收和全反射两种情况。接收器放置在三种蓝色子像素点的出光面和四周,用于收集从MQW内部出射到空气中的光线。由此,LEE可以表示为出射到空气中的光线所携带的总能量之和与从MQW内出射的所有光线所携带的总能量之和的比值,三种蓝色像素点的正面光强分布也可通过接收器收集到的数据整理得出。

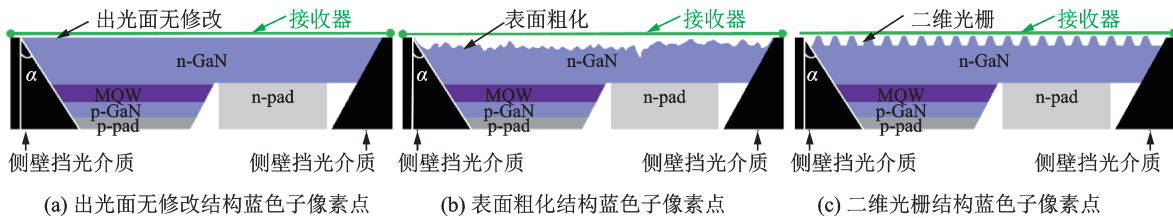


图4 三种不同出光面的Micro LED蓝色子像素点模型

Fig.4 Blue sub-pixel point models of three Micro LEDs with different luminous surfaces

首先分析了侧壁倾角 α 在 $0^\circ\sim 40^\circ$ 区间内蓝色子像素点的LEE变化趋势, α 步长选择为 2° ,如图5(a)~(c)所示。图中无侧壁挡光介质下灰色的曲线表示不同出光面结构蓝光Micro LED的总LEE,当侧壁倾角较小时,修改Micro LED出光面结构给Micro LED总LEE带来显著的提升。在倾角 0° 时,具备表面粗化和二维光栅的Micro LED对比出光面无修改的Micro LED,总LEE可分别做到2.41、2.45倍的提升,结合胡新培^[21]等人通过优化光栅的占空比、周期和高度使Micro LED的LEE提升了2.42倍,以及郑清洪^[22]等人通过设计最佳表面粗化结构在理想状况下可以使LED的LEE提升3倍以上的结果,可知对于出光面无修改的Micro LED,只有出

射角度小于 23° 的光线才可以出射到空气中,大量光线无法出射到空气中从而导致较低的LEE,而具备表面微结构的Micro LED可以破坏出光界面处严重的全反射,因此显著提升Micro LED总LEE。但随着侧壁倾角的增大,三种不同出光面蓝光Micro LED的总LEE差距逐渐变小,这是由于随着侧壁倾角逐渐变大,有效有源区面积逐渐变小,侧壁出光面积占总出光面积的比值逐渐增大,大量的光线从侧壁出射导致。由图5可知,具备侧壁全反射型挡光介质的蓝色子像素点的正面LEE均大于侧壁全吸收型,由此推断,侧壁全反射型挡光介质可以将Micro LED侧壁出光带到正面出射,因此侧壁反射型挡光介质对蓝色子像素点是必需的结构,这一点

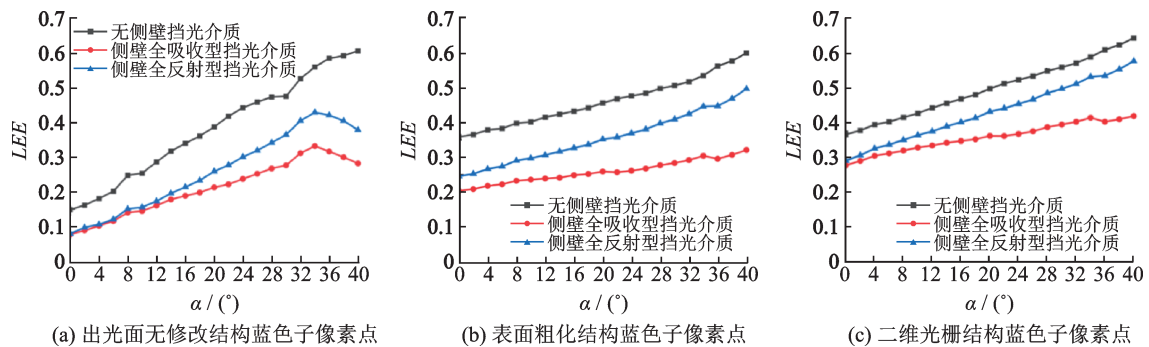


图5 三种蓝色子像素点在无侧壁挡光介质、侧壁全反射型挡光介质、侧壁全吸收型挡光介质下的LEE随侧壁倾角 α 的变化趋势

Fig.5 Variation trend of LEE with α in blue sub-pixels of three different structures

也与 Zhang^[23]等人的分析一致。图中还注意到,在侧壁全反射型挡光介质下,当侧壁倾角大于 34° 时,出光面为无修改 Micro LED 的蓝色子像素点的正面 LEE 呈现下降趋势,而另外两种蓝色子像素点的 LEE 则一直在上升,这是由于随着侧壁倾角增大,侧壁出光占比也逐渐增大,此时从侧壁反射到正面的光线大多在光提取锥外,这部分的光线在器件内部经多次反射后,大部分会被 Micro LED 各叠层材料和金属电极吸收,只有少部分达到出射角度的光线才能出射到空气中,具备表面微结构的蓝色子像素点可以有效的破坏全反射发生的条件,减少光线在器件内部的损耗,因此表面微结构更有利于提高被侧壁反射到正面的光线透射率。根据上述分析可知,具备表面微结构 Micro LED 和侧壁反射型挡光介质的蓝色子像素点可获得更大的正面出光。

考虑到侧壁全反射型挡光介质结构更适用于蓝色子像素点,分析具备侧壁全反射型挡光介质的

三种蓝色子像素点在侧壁倾角分别为 0° 、 10° 、 20° 、 30° 、 40° 时的归一化正面光强分布,如图 6(a)~图 6(c)所示。由图示可知,出光面无修改 Micro LED 的蓝色子像素点正面光强分布受侧壁倾角的影响很大,当侧壁角度为 0° 时,呈现朗伯分布,但随着侧壁倾斜角度变大以及有源区面积变小,更多侧壁的光反射到正面,导致光型逐渐偏离朗伯型。二维光栅 Micro LED 的蓝色子像素点的正面光强分布变化很小,可知具备二维光栅 Micro LED 的蓝色子像素点的光型主要受二维光栅结构的影响。表面粗化 Micro LED 的蓝色子像素点可随机反射来自侧壁的光线,进而破坏全内反射,因此其光型在不同侧壁倾角下均呈现出朗伯分布的特点。由此可知,侧壁倾角的变化会影响蓝色子像素点光强分布,而具备表面微结构 Micro LED 的蓝色子像素点可以减少这一影响。

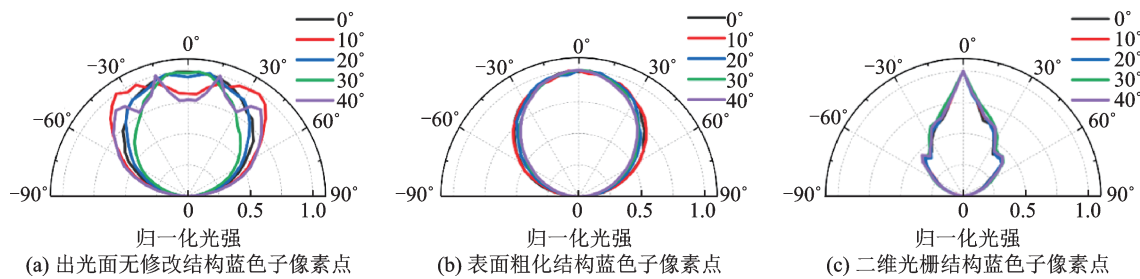


图 6 三种蓝色子像素点在侧壁倾角为 0° 、 10° 、 20° 、 30° 、 40° 下的光强分布

Fig.6 Light intensity distribution of three kinds of blue sub-pixels at different side-wall angles

2.2 红绿子像素点结构分析

红绿子像素点模型由蓝光 Micro LED、红绿量子点膜、侧壁挡光介质组成,为搭建红绿子像素点模型,上述结构的参数选取至关重要。在侧壁挡光介质上,侧壁反射型挡光介质可将侧壁出光反射到正面,以此增大蓝光光程提升光转换效率,同时减小蓝光透过率,因此侧壁反射型挡光介质对红绿子像素点是必需的结构。在侧壁倾角上,考虑到上述三种结构的蓝色子像素点在 Micro LED 侧壁倾角为 34° 时,均可获得较大的正面 LEE,选用此倾角来对比分析不同结构的蓝光 Micro LED 对红绿子像素点的影响。在量子点膜参数选取上,以实际绿色量子点尺寸为 5 ± 2 nm、红色为 8 ± 2 nm、散射粒子为 200 nm 作为参考,仿真中设置尺寸为 5 nm 绿色量子点、 8 nm 红色量子点、 200 nm 散射粒子,而量子点与散射粒子的浓度和厚度参数则通过仿真确

定,以倾角 34° 、侧壁全反射型挡光介质、出光面无修改的蓝光 Micro LED 来分析确定量子点膜模型参数,并在红绿像素点的模型上方放置接收器,用于收集出射光线并分析转换效率和光强分布,其模型结构如图 7 所示。

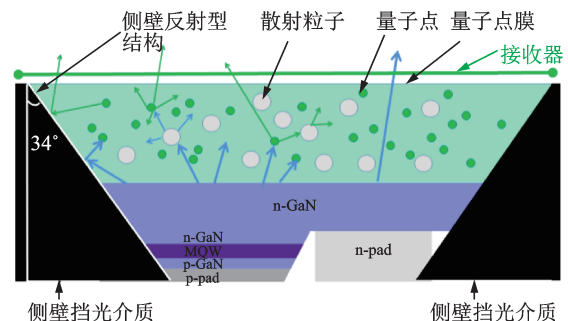


图 7 在侧壁全反射型挡光介质和 34° 倾角下红绿像素点模型结构示意图

Fig.7 The structure of the red and green sub-pixel model with a sidewall fully reflective light-blocking medium and 34° tilt angle

仿真结果表明提高量子点和散射粒子的质量分数以及增大量子点膜厚度可以减少蓝光透过率、提高色纯度,但却减少了光转换效率,而当红绿量子点膜厚度为10 μm,量子点质量分数为35%,散射粒子质量分数为20%时,设置MQW内部出射的总光通量为10 lm,此时入射到量子点膜内的蓝光为5.82 lm,接收器分别接受到1.91 lm的红光、1.61 lm的绿光以及0.006 1 lm、0.020 3 lm的蓝光。光转换效率定义为转换后的红绿光与入射到量子点膜的蓝光比值,在此结构下的红绿光谱如图8所示,可看出此参数下的红绿子像素点有较少的蓝光透过,因此选择上述量子点膜参数来进行后续红绿量子点模型的搭建。在上述量子点模型参数下以及三种Micro LED的MQW内部出射的总光通量均为10 lm时,对于具备表面粗化Micro LED的红绿子像素点,此时入射到量子点膜内的蓝光为5.98 lm,接收器分别接受到1.92 lm的红光、1.62 lm的绿光以及0.007 7 lm、0.024 9 lm的蓝光。对于具备二维光栅Micro LED的红绿子像素点,此时入射到量子点膜内的蓝光为6.15 lm,接收器分别接受到2.02 lm的红光、1.78 lm的绿光以及0.006 2 lm、0.023 6 lm的蓝光。根据上述结果可知,对于三种不同结构的子像素点,当光线从MQW内部出射后,入射到红绿子像素点中量子点膜的蓝光比值并不像蓝色子像素点中入射到空气的蓝光比值差距那么大,这是因为量子点膜的折射率介于空气和GaN之间,在侧壁倾角较大的情况下,三种像素点的红绿量子点膜所吸收的蓝光值比较接近,此外由于三种红绿子像素点具有相同的量子点膜参数,因此三种红绿子像素点转换后的红绿光以及蓝光透过值都比较接近。

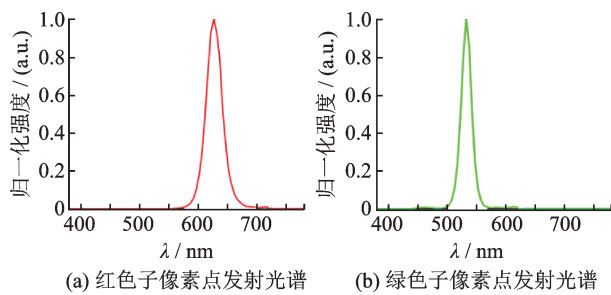


图8 子像素点发射光谱
Fig.8 Emission spectrum of sub-pixels

图9给出了具备34°倾角和侧壁全反射型挡光介质的红绿子像素点在三种不同出光面Micro LED结构下的归一化光强分布,可以看出红绿子像素点的光型均呈现出朗伯分布的特点,且不会受到蓝光Micro LED结构的影响,这是因为经过红绿量子点

转换后的光线具有各向同性特点,散射粒子用于增加散射概率,可知量子点膜对光型具有修饰作用,即使激发光源的光强分布不同,但均可获得一致的朗伯分布红绿光。

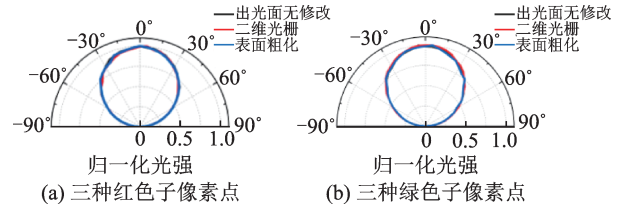


图9 子像素点在不同Micro LED结构下的光强分布图
Fig.9 Light intensity distribution of sub-pixels with different Micro LED structures

2.3 像素点显示性能分析

采用量子点膜色转换方案实现Micro LED全彩显示的像素点,除了要具备正面出光效率高、光转换效率高、蓝光透过率低的特点外,红绿蓝子像素点的合成颜色也要具有良好的均一性,即在不同视角下观看屏幕时,不会感受到明显的颜色偏差。不同视角下观测颜色的色坐标值可以在CIE1976空间坐标中表示,以 (u_{ref}', v_{ref}') 记录0°视角下的色坐标值,以 (u', v') 记录10°~80°视角下的色坐标值,间隔为10°,以 $du'dv'$ 的值评估色偏值大小,

$$du'dv' = \sqrt{(u' - u_{ref}')^2 + (v' - v_{ref}')^2} \quad (1)$$

当色偏值 $du'dv'$ 超过0.02时可以被肉眼所识别,以红绿蓝三原色、白点D65和红绿、红蓝、蓝绿构成的100%饱和色,红绿蓝和白点D65构成的三种50%饱和色共10种参考颜色来衡量像素点在整个色域内的色偏^[24]。红绿蓝子像素点间距为50 μm,像素阵列列为6×6,球形接收器的半径为5 cm,其球心位于像素阵列的中心位置,不同视角下的色坐标值可根据球形接收器所收集到的光线分析表示。

图10展示了在34°倾角和侧壁全反射型挡光介质下,出光面分别为无修改、表面粗化、二维光栅Micro LED的三种像素点红绿蓝归一化光强分布,以及色域图和十种参考颜色在0°~80°视角下的CIE坐标。在色域方面,量子点膜色转换方案可覆盖122%NTSC标准和111%DCI-P3标准,具有高色域的特点。在红绿蓝光型匹配度和色偏上:具备表面粗化Micro LED的像素点有较高的红绿蓝光型匹配度,七种混合颜色最大的色偏值低于0.008;具备出光面无修改Micro LED的像素点红绿蓝光型匹配度稍差,最大色偏值为0.015;具备二维光栅Micro LED的像素点红绿蓝光型匹配度最差,随着观

测视角的增大,最大色偏值已超过 0.02。不一致的红绿蓝光型会导致不同视角下的红绿蓝混色比例存在差异,从而导致色偏,出光面为表面粗化 Micro LED 像素点的红绿蓝光型一致,因此在上述三种像素点结构中具有最小的色偏值。考虑到实际生产过程中,不同厂商由于工艺条件不同刻蚀出的 Micro LED 倾角也不同,按照上述方法分析了三种像素点在侧壁倾角 $0^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 范围内的光型匹配度与色

偏情况。仿真发现,具备表面粗化 Micro LED 的像素点红绿蓝光型具有较好的匹配度,均呈现出朗伯分布的特点,最大色偏值在 $0^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 范围内均低于 0.02,另外两种结构的像素点因蓝色子像素点光型无法在 $0^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 范围内均具备朗伯分布的特点,这与朗伯分布的红绿子像素点无法做到一致的匹配度,因此无法满足在不同 Micro LED 倾角下色偏值均低于 0.02 的要求。

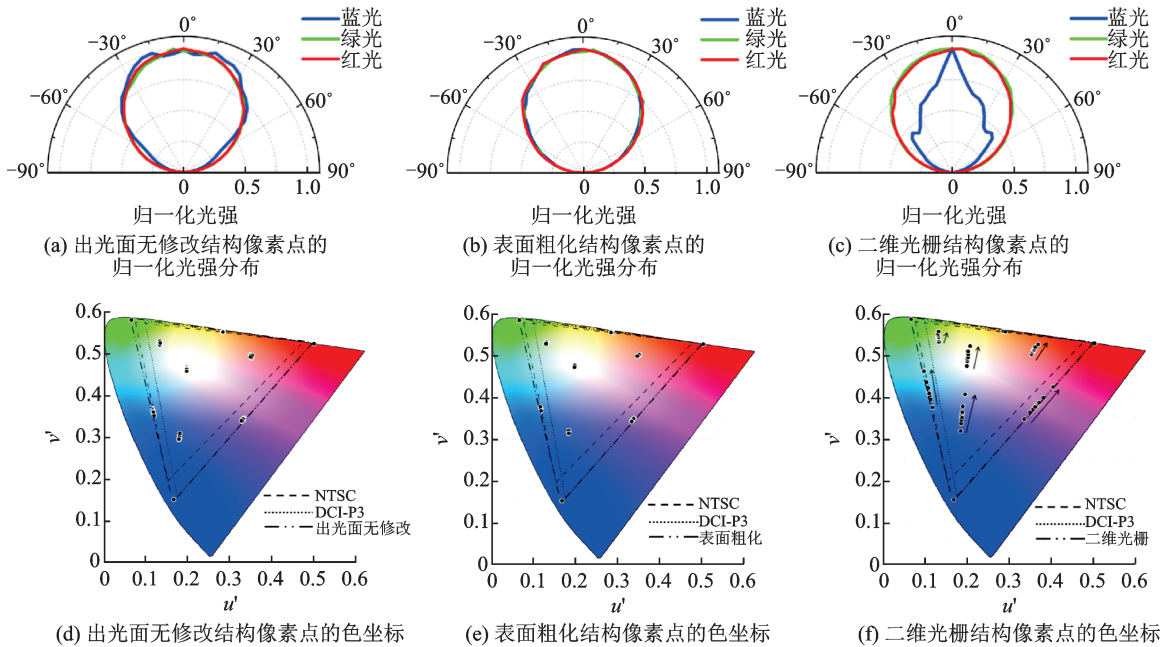


图 10 不同结构像素点的红绿蓝归一化光强分布和 10 种参考颜色在 $0^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 视角下的 CIE 坐标

Fig.10 The red, green and blue normalised light intensity distributions at different structured pixel points and CIE coordinates for 10 reference colors at $0^{\circ}\sim 80^{\circ}$ viewing angle

根据上述分析可知,非朗伯分布的蓝色子像素点与朗伯分布的红绿子像素点光型匹配不一致会造成色偏,虽然可以在蓝色子像素点上方放置散射粒子来改变其光型分布,但势必会造成蓝色子像素点出光效率下降的问题,另外工艺也变得复杂,而具备侧壁反射型挡光介质和表面粗化结构的蓝色子像素点具有工艺简单、高效正面出光和光强分布为朗伯型的特点,这与红绿子像素点达到良好的匹配度,因此具备表面粗化 Micro LED 和侧壁反射型挡光介质的像素点更适合于量子点膜色转换方案。

3 结 论

基于射线追迹法,分析设计了量子点膜色转换方案的像素点结构模型,从构建出光面分别为无修改、表面粗化、二维光栅三种结构的 Micro LED 出发,分析了由上述三种结构的 Micro LED 与侧壁挡

光介质结合组成蓝色子像素点的 LEE 和光强分布在不同侧壁倾角下的变化趋势;接着优化了量子点膜的模型参数,并分析了三种不同结构的 Micro LED 对红绿子像素点光转换效率和光强分布的影响;最后对上述不同结构全彩像素点整体的色偏性能做了对比研究。通过对上述不同结构的像素点分析可知,具备表面粗化 Micro LED 和侧壁反射型挡光介质的像素点在 $0^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 倾角下均可获得较大的正面 LEE 和低于 0.02 的色偏,相比其他结构更适合于量子点膜色转换方案。

参 考 文 献

- [1] Jiang H X, Lin J Y. Nitride micro-LEDs and beyond-A decade progress review [J]. Optics Express, 2013, 21 (9) : A475-A484.
- [2] Liu Z, Chong W C, Wong K M, et al. GaN-based LED micro-displays for wearable applications [J]. Microelectronic Engineering, 2015, 148: 98-103.

- [3] Parbrook P J, Corbett B, Han J, et al. Micro-light emitting diode: From chips to applications [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2021, 15(5): 2000133.
- [4] 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.
- [5] Zhou X, Tian P, Sher C W, et al. Growth, transfer printing and colour conversion techniques towards full-colour micro-LED display [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2020, 71: 100263.
- [6] Hsiang E L, Yang Z, Yang Q, et al. Prospects and challenges of mini-LED, OLED, and micro-LED displays [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2021, 29(6): 446-465.
- [7] 潘祚坚, 陈志忠, 焦飞, 等. 面向显示应用的微米发光二极管外延和芯片关键技术综述[J]. *物理学报*, 2020, 69(19): 198501.
- [8] Wang Z, Shan X, Cui X, et al. Characteristics and techniques of GaN-based micro-LEDs for application in next-generation display [J]. *Journal of Semiconductors*, 2020, 41(4): 041606.
- [9] Huang Y M, Chen J H, Liou Y H, et al. High-uniform and high-efficient color conversion nanoporous GaN-based Micro-LED display with embedded Quantum Dots [J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(10): 2696.
- [10] Liu Z J, Lin C H, Hyun B R. Micro-light-emitting diodes with quantum dots in display technology [J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9(3): 531-553.
- [11] Huang Y M, Singh K J, Liu A C, et al. Advances in quantum-dot-based displays [J]. *Nanomaterials*, 2020, 10(7): 1327.
- [12] Xuan T, Shi S, Wang L, et al. Inkjet-printed quantum dot color conversion films for high-resolution and full-color micro light-emitting diode displays [J]. *Journal of Physical Chemistry Letters*, 2020, 11(13): 5184-5191.
- [13] Lee J S, Lee J, Kim S, et al. GaN light-emitting diode with deep-angled mesa sidewalls for enhanced light emission in the surface-normal direction [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2008, 55(2): 523-526.
- [14] Kao C C, Kuo H C, Huang H W, et al. Light-output enhancement in a nitride-based light-emitting diode with 22 degrees undercut sidewalls [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(1): 19-21.
- [15] Ryu H Y, Pyo J, Ryu H Y. Light extraction efficiency of GaN-based micro-scale light-emitting diodes investigated using finite-difference time-domain simulation [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(2): 1600110.
- [16] Li Z T, Li J X, Li J S, et al. Scattering effect on optical performance of quantum dot white light-emitting diodes incorporating SiO₂ nanoparticles [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2020, 56(3): 3600109.
- [17] Gou F, Hsiang E L, Tan G, et al. High performance color-converted micro-LED displays [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2019, 27(4): 199-206.
- [18] Liu Z, Wang K, Luo X, et al. Precise optical modeling of blue light-emitting diodes by Monte Carlo ray-tracing [J]. *Optics Express*, 2010, 18(9): 9398-9412.
- [19] Lan S, Wan H, Zhao J, et al. Light extraction analysis of AlGaInP based red and GaN based blue/green flip-chip Micro-LEDs using the monte carlo ray tracing method [J]. *Micromachines*, 2019, 10(12): 860.
- [20] Tian M, Yu H, Memon M H, et al. Enhanced light extraction of the deep-ultraviolet micro-LED via rational design of chip sidewall [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(19): 4809-4812.
- [21] 胡新培, 蔡俊虎, 叶媛媛, 等. 高光效 GaN 基 Micro-LED 仿真模型研究[J]. *光学学报*, 2022, 42(15): 204-213.
- [22] 郑清洪, 刘宝林, 张保平. 表面粗化提高 GaN 基 LED 光提取效率的模拟[J]. *电子器件*, 2008, 31(4): 1077-1080.
- [23] Zhang X, Chen A, Yang T, et al. Tripling light conversion efficiency of μ LED displays by light recycling black matrix [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2022, 14(2): 7014207.
- [24] Gou F, Hsiang E L, Tan G, et al. Angular color shift of micro-LED displays [J]. *Optics Express*, 2019, 27(12): A746-A757.



(上接第 211 页)

- [12] Toyoda K, Takahashi F, Takizawa S, et al. Transfer of light helicity to nanostructures [J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(14): 143603.
- [13] Omatsu T, Miyamoto K, Toyoda K, et al. A new twist for materials science: The formation of chiral structures using the angular momentum of light [J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(14): 1801672.
- [14] Yang D, Li Y, Deng D, et al. Chiral optical field generated by an annular subzone vortex phase plate [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(19): 4594-4597.
- [15] Abramochkin E G, Volostnikov V G. Spiral light beams [J]. *Physics-Uspekhi*, 2004, 47(12): 1177.
- [16] Chang C, Gao Y, Xia J, et al. Shaping of optical vector beams in three dimensions [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(19): 3884-3887.
- [17] Ni J, Wang C, Zhang C, et al. Three-dimensional chiral microstructures fabricated by structured optical vortices in isotropic material [J]. *Light: Science & Applications*, 2017, 6(7): e17011.
- [18] 秦雪云, 朱刘昊, 台玉萍, 等. 多平面波干涉的光学涡旋晶格特性研究[J]. *光学学报*, 2021, 41(21): 2126001.
- [19] Ma H, Zhang Y, Min C, et al. Controllable propagation and transformation of chiral intensity field at focus [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(17): 4823-4826.
- [20] Richards B, Wolf E. Electromagnetic diffraction in optical systems, II. Structure of the image field in an aplanatic system [J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1959, 253(1274): 358-379.
- [21] 郭沈言, 崔志伟, 王举, 等. 紧聚焦涡旋光束的局域光学手性分析[J]. *光子学报*, 2021, 50(10): 384-393.
- [22] 陈康, 厉淑贞, 潘玉琪, 等. 部分相干径向偏振旋转对称幂指数相位涡旋光束紧聚焦特性研究[J]. *光学学报*, 2022, 42(22): 2226002.
- [23] Ma H, Li X, Tai Y, et al. In situ measurement of the topological charge of a perfect vortex using the phase shift method [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(1): 135-138.