

文章编号: 1005-5630(2015)04-0293-06

LED 微显示技术

邹 兵¹, 张文君¹, 徐 阁¹, 姚 然¹, 许 键^{1,2}

(1. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;

2. 宾夕法尼亚州立大学 工程科学系, 宾夕法尼亚州 16802, 美国)

摘要: LED 微显示是一种基于芯片上集成高密度二维发光二极管阵列的全固体主动发光器件, 其拥有系统设计简单、光能利用率高、响应速度快及工作温度范围宽等优点。主要介绍了 LED 微显示技术实现方式、最新进展及其应用前景。

关键词: 微显示器; LED 阵列; 硅基 CMOS; 彩色化显示

中图分类号: TN873 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1005-5630.2015.04.003

The technology of micro-size LED display

ZOU Bing¹, ZHANG Wenjun¹, XU Ge¹, YAO Ran¹, XU Jian^{1,2}

(1. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Department of Engineering Science, Pennsylvania State University, University Park, PA 16802, USA)

Abstract: The micro-size LED display is made of two-dimensional arrays of high-density light-emitting diodes. It is an all-solid active light-emitting device and has many advantages, including simple system design, high luminous efficiency, fast response and the wide range of operating temperature. In this paper, the design and fabrication of the micro-LED display devices will be reviewed and linked to their applications.

Keywords: micro-display; LEDs arrays; CMOS on silicon; colorization display

引 言

近几年,随着 LED 芯片工艺技术的日益进步,使得 Micro-LED 作为像素的 LED 微显示技术成为可能^[1-3]。2012 年 Day 等^[4]成功制作了分辨率为 640×480 、像素直径为 $12 \mu\text{m}$ 的 InGaN/GaN 量子阱结构 LED 微显示阵列,显现出 LED 微显示技术巨大的应用前景。随着移动互联网和智能设备的普及,人们对信息呈现方式的多样化需求也逐渐强烈。如何在小尺寸设备中实现更好的显示,成为众多应用领域亟待解决的问题。LED 微显示技术正是这样一种合时宜的技术。相比目前市场上存在的其它几种微显示技术(如 LCD 技术、OLED 技术、硅基液晶技术和 DLP 技术),LED 微显示技术这种自发光微显示技术以其体积小、亮度高、响应速度快、抗干扰能力强等优点^[5-6]而极具市场潜力。

1 LED 微显示实现方式

1.1 像素的结构

LED 微显示的像素单元采用成熟的多量子阱 LED 芯片技术^[7],最大限度地体现 LED 器件作为显示

收稿日期: 2014-12-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(610728007)

作者简介: 邹 兵(1991—)男,硕士研究生,主要从事半导体发光器件制作工艺及应用的研究。E-mail: usstzoubing@foxmail.com

通信作者: 许 键(1970—)男,教授,主要从事半导体发光器件方面的研究。E-mail: jianxu@enr.psu.edu

器的优势。如图 1 所示,以 Choi 等制作的 InGaN 基 LED 芯片为例^[8]:像素结构从下往上依次为蓝宝石衬底层,一层 25 nm 的 GaN 缓冲层,一层 3 μm 的 N 型 GaN 层($n=3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$),一层包含 5 个周期的多量子阱(MQW)有源层(其中蓝光芯片的 MQW 有源层包含 5 个周期的 2.5 nm 势阱层/7.5 nm GaN 势垒层),一层 0.25 μm 的 P 型 GaN 接触层($n=3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$),电流扩展层和 P 型电极。像素单元一般通过四个步骤制作:第一步,通过 ICP 刻蚀工艺^[9],刻蚀沟槽至蓝宝石层,在外延片上隔离出分离的长条形 GaN 平台;第二步,在 GaN 平台上,通过 ICP 刻蚀,确立每个特定尺寸的像素单元;第三步,通过剥离工艺在 P 型 GaN 接触层上制作 Ni/Au 电流扩展层;第四步,通过热沉积在 N 型 GaN 层和 P 型 GaN 接触层上制作 Ti/Au 欧姆接触电极,每一列像素的阴极通过 N 型 GaN 层共阴极连接,每一行像素的阳极根据驱动方式的不同选择不同的方式连接。

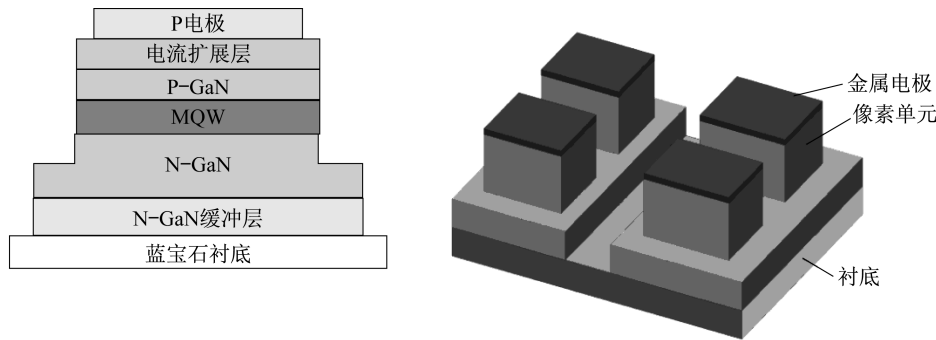


图 1 像素结构

Fig. 1 Structure of a pixel

1.2 像素阵列的驱动

1.2.1 驱动方式

LED 微显示阵列可以通过两种方式实现驱动,根据结构的不同,有被动矩阵驱动方式和主动矩阵驱动方式。

如图 2 所示,被动矩阵驱动方式中,将像素的电极做成矩阵型结构,即水平一组像素的同一性质电极共用,垂直一组像素的相同性质的另一电极共用。两层电极之间通过沉积 SiO₂ 层进行电学隔离。其中阳极之间通过喷溅工艺,形成 Ti/Au 金属连接,阴极之间通过共用 N 型 GaN 层形成连接。在实际电路驱动的过程中,采用逐行扫描的方式显示。此种方式制作成本及技术门槛较低,但受制于驱动方式,无法很好地实现高分辨率显示^[8,10]。

如图3所示,主动矩阵驱动方式中,所有像素阴极之间通过共用N型GaIn层形成连接,每个像素的阳

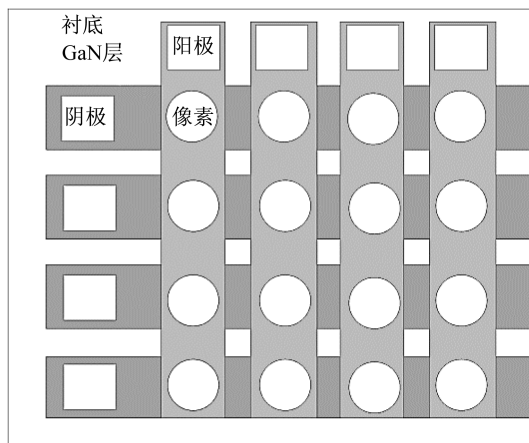


图 2 被动驱动方式

Fig. 2 Driving mode of passive matrix

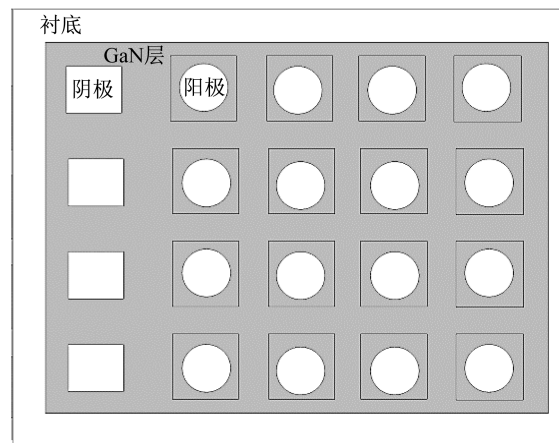


图 3 主动驱动方式

Fig. 3 Driving mode of active matrix

极与硅基 CMOS 驱动背板进行金属键合,整体采用背发光方式^[11-15]。这种驱动方式反应速度较快,不受扫描电极数的限制,每个像素单元可以单独实现寻址,独立控制,适合多数应用场合。

1.2.2 芯片和硅基 CMOS 驱动背板的键合

如图 4 所示,在 Liu 等的研究中,采用了 Au-In-Au 金属键合工艺,实现了 LED 阵列与硅基 CMOS 驱动背板的电学与物理连接^[16-17]。制作过程中,首先在 CMOS 驱动背板中,通过喷溅工艺在接触电极区域沉积一层 100 nm 的 Ni/Au 层作为黏附层和 In 扩散阻挡层。然后通过热沉积和剥离工艺在 Ni/Au 层上沉积一层 6 μm 的 In 层。在回流炉中进行退火处理后,原先沉积的 In 层回流,形成一个球形的金属球。最后通过倒装焊设备即可实现 LED 微显示阵列与驱动背板的对接。

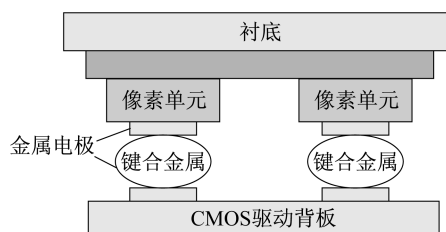


图 4 芯片的倒装键合

Fig. 4 Flip-chip bonding

2 LED 微显示的研究进展

随着研究的不断推进,LED 微显示的显示性能不断提高。2004 年 Choi 等^[8]采用被动方式驱动 LED 微显示阵列,成功制作了尺寸为 3 mm \times 2 mm,分辨率为 128 \times 96,像素尺寸为 22 μm 的蓝色(468 nm)、绿色(508 nm)显示芯片,在总注入电流为 60 mA 时亮度可达 30 000 cd/m^2 。

2007 年 Gong 等^[18]采用被动方式驱动制作了分辨率为 64 \times 64,像素直径 16 μm ,像素间距 34 μm 的蓝色(470 nm)、绿色(510 nm)和紫外(370 nm)的 LED 微显示阵列。Griffin 等^[17]采用硅基 CMOS 背板驱动的主动驱动方式,成功制作了分辨率为 16 \times 16、像素直径为 72 μm 、像素间距 28 μm 的蓝色和紫外 LED 微显示阵列。

2012 年 Day 等^[4]采用硅基 CMOS 背板驱动的主动驱动方式,成功制作了芯片尺寸为 3 mm \times 2 mm、分辨率为 640 \times 480、像素直径为 12 μm 、像素间距为 6 μm 的绿色和蓝色 InGa N/GaN 量子阱结构 LED 微显示阵列,单个像素在 1 μm 的电流驱动下,亮度可达 4×10^6 cd/m^2 。单个像素的电流密度只有 0.7 A/ cm^2 ,是传统的 300 $\mu\text{m}\times 300 \mu\text{m}$ LED 指示灯芯片(22 A/ cm^2)的 1/30,更低的工作电流保证了 LED 微显示芯片有着比传统 LED 芯片更加优秀的寿命表现。

2013 年 Chong 等^[19]采用硅基 CMOS 背板驱动的主动驱动方式,制作了芯片尺寸为 4.5 mm \times 4.5 mm,分辨率为 60 \times 60,像素尺寸为 50 μm ,像素间距 20 μm 的紫外(380 nm)、红色(630 nm)、绿色(535 nm)、蓝色(445 nm)四种波长的 LED 微显示阵列,并成功实现彩色投影显示,LED 微显示的众多优势逐渐显现。

3 目前存在的问题及解决方法的探索

3.1 像素间电流分布不均

无论采取哪种驱动方式,其中共阴极连接的电极都会存在这样的问题:如图 5 所示,随着像素距离阴极接触电极长度的增加,其导电通路的等效电阻增大,最终导致流过不同像素的电流分布不均。

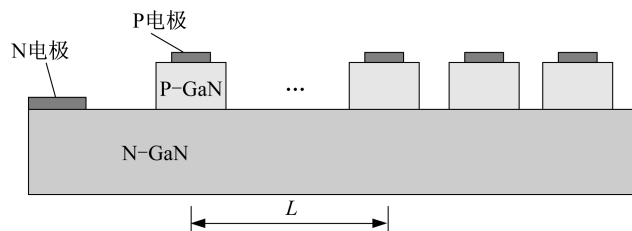


图 5 等效电阻结构

Fig. 5 The structure of equivalent resistance

Gong 等、Liu 等分析了问题产生原因^[18,20],并给出改进的电极设计方案。如图 6 所示,在 Gong 等的

方案中,在传统的共阴极连接的基础上,在 GaN 层增加一条金属电流传导线,使得像素间等效电阻的差异小于 8%。如图 7 所示,Liu 等采用了环绕电极和双电极的方法也极大提高了电流的分布均匀性。

3.2 像素间相互干扰

电流注入有源层后,辐射复合释放出的光子会向各个方向随机出射。为了避免像素间的干扰,在传统的制作 LED 微显示芯片时,通过 ICP 刻蚀,将外延层刻蚀至衬底层来实现像素间的电学和光学隔离。包兴臻等^[21]提出利用高反射率的均匀掺单晶硅纳米颗粒的聚酰亚胺作为复合材料来填充隔离沟槽,将侧面出射的光反射到上表面,实现了相邻两个发光单元之间的光学和电学隔离,具有一定参考意义。

3.3 外量子效率的提高

LED 微显示中,虽然基于载流子的辐射复合的内量子效率很高,但光子从有源层产生,至出射到自由空间的取光效率一直是限制光利用效率提升的一个关键因素。Gong 等在制作 LED 阵列时^[22],使用衬底减薄的方式,减弱衬底的吸收作用,部分的提高了外量子效率。梁静秋等在制作 LED 微显示阵列时运用分布式布拉格反射光栅的方式来提高单个像素的取光效率^[23]。

4 LED 微显示的彩色化

4.1 通过三种颜色 LED 阵列混合显示彩色

当外延片以蓝宝石为衬底,有源区为 InGaN/GaN 量子阱结构时,通过改变 InGaN/GaN 中 InGaN 的相对百分比,调整三元半导体 InGaN 中 In 摩尔组份,就可以得到 1.95 eV 到 3.40 eV 连续变化的直接带隙半导体,可以制备高效发光的蓝色、绿色、红色 LED 芯片^[24]。通过三种颜色芯片和合色棱镜的作用,即可显示彩色图像。Liu 等采用这种方式成功制作出三色 LED 微阵列,实现了彩色投影显示^[25]。

4.2 通过三色荧光粉实现彩色化

传统 LED 照明中采用的蓝光或紫外光加荧光粉的方式,LED 微显示中也可以用此种方式实现彩色显示。目前 Zhang 等已经实现了紫外 LED 阵列微显示的制作。如图 8 所示,Xu 等提出利用掩模版和含有量子点荧光粉的溶液通过喷雾沉积的方式^[26],在特定区域沉积特定荧光粉的技术来实现 LED 微阵列的彩色化显示,具有很大的实践意义。

4.3 白光加滤色片实现彩色化

类似于液晶显示的方式,通过蓝光混合黄光荧光粉产生白光。再通过滤色片取色,实现彩色化也是一种可行的方案。但白光通过滤色片提取单色光的效率很低,使用此方式无法实现高亮度显示。

在彩色化现实中,三色 LED 阵列制作工艺简单,能量利用效率更高,但由于需要合色棱镜,将不利于设备的小型化。三色荧光粉实现彩色化显示时,系统的光学设计更简单,但会在显示分辨率的提高上存在困难。根据应用场景的不同,合理的选择不同方式将会是实现彩色化显示的最佳方案。

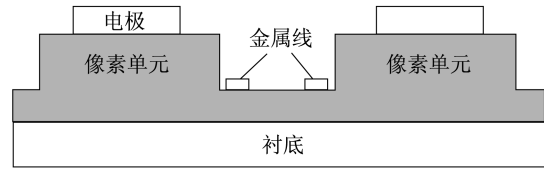


图 6 金属电流传导线
Fig. 6 Design of metal line

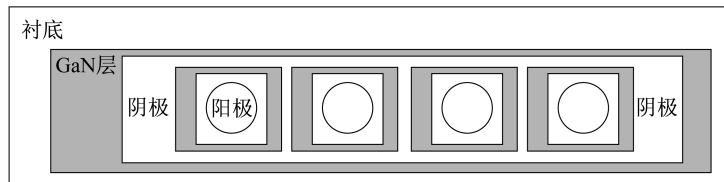


图 7 环形电极和双电极
Fig. 7 Design of metal wrap-around and double-sided cathodes

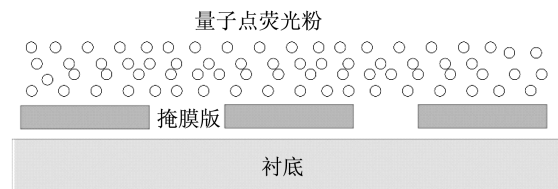


图 8 喷雾沉积量子点
Fig. 8 Mist fabrication of quantum dot devices

5 LED微显示应用前景

目前市场上主要有四种微显示技术^[27]:LCD技术、OLED技术、硅基液晶技术(LCOS)^[28]和DLP技术。技术之间对比见表1。其中LCD微显示器是目前发展较为成熟的微显示技术,但其需要背光源,且亮度较低,应用场景受到很大限制。OLED型微显示器是一种有机电致发光的全固体显示器件,虽然有许多优点,但由于核心部分为有机材料,目前仍存在着不易实现全彩显示、有机发光层制作困难以及有机物老化导致寿命较短等缺陷。LCOS微显示器虽具有高分辨率、高亮度、轻薄及寿命长等优点,但其显示光学系统过于复杂、制作困难及生产成本较高,使得LCOS应用研究逐渐陷入低谷。DLP技术由于其微小尺寸显示上并不具有优势,因此市场前景有限。

表1 各种微显示技术对比
Tab. 1 Comparison of various micro display techniques

技术类型	LCD	OLED	LCOS	DLP	LED微显示
光源的实现	需要背光	自发射	需要背光	需要背光	自发射
光源利用率	中等	高	低	高	高
亮度	3 000 cd/m ² (全彩)	1 500 cd/m ² (全彩)	1 000 cd/m ² (全彩)	1 000 cd/m ² (全彩)	10 ⁵ cd/m ² (全彩)
	10 ⁴ cd/m ² (绿色)	10 ³ cd/m ² (黄色)			10 ⁷ cd/m ² (蓝/绿)
对比度	200 : 1	Very High >10 ⁴ : 1	High	High	Very High >10 ⁴ : 1
响应时间	ms	ms	ms	ms	ns
操作温度	0~60 ℃	-50~70 ℃	0~60 ℃	-10~70 ℃	-100~120 ℃
寿命	中等	中等	中等	中等	长
成本	低	低	低	高	低

LED微显示器相对比其他类型的微显示器有其独特的优点,以谷歌眼镜为代表的新一代智能设备正预示着微显示市场的美好未来。LED微显示技术由于先天的优势,将代表着微显示未来的方向,应引起企业和研究机构的重视。

参考文献:

- [1] JIN S X, LI J, LI J Z, et al. GaN microdisk Light emitting diodes[J]. Applied Physics Letters, 2000, 76(5): 631-633.
- [2] CHOI H W, JEON C W, DAWSON M D, et al. Efficient GaN-based micro-LED arrays[C]//Materials Research Society Symposium Proceedings. Warrendale, Pa: Materials Research Society, 2002, 743: 433-438.
- [3] JEON C W, CHOI H W, DAWSON M D. Fabrication of matrix-addressable InGaN-based micro-displays of high array density[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15(11): 1516-1518.
- [4] DAY J, LI J, LIE D Y C, et al. III-Nitride full-scale high-resolution micro-displays[J]. Applied Physics Letters, 2011, 99(3): 031116.
- [5] ZHANG H X, MASSOUBRE D, MCKENDRY J, et al. Individually-addressable flip-chip AlInGaN micro-pixelated light emitting diode arrays with high continuous and nanosecond output power[J]. Optics express, 2008, 16(13): 9918-9926.
- [6] CHOI H W, JEON C W, DAWSON M D, et al. Mechanism of enhanced light output efficiency in InGaN-based micro-light emitting diodes[J]. Journal of Applied Physics, 2003, 93(10): 5978-5982.
- [7] KIM H M, CHO Y H, LEE H, et al. High-brightness light emitting diodes using dislocation-free indium gallium nitride/gallium nitride multi-quantum-well nanorod arrays [J]. Nano letters, 2004, 4(6): 1059-1062.
- [8] CHOI H W, JEON C W, DAWSON M D. High-resolution 128×96 nitride micro-display[J]. IEEE Electron Device Letters, 2004, 25(5): 277-279.
- [9] CHOI H W, JEON C W, DAWSON M D. Tapered sidewall dry etching process for GaN and its applications in device fabrication [J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, 2005, 23(1): 99-102.
- [10] JEON C W, CHOI H W, GU E, et al. High-density matrix-addressable AlInGaN-based 368-nm microarray light-emitting diodes[J].

- IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(11): 2421-2423.
- [11] LIU Z J, CHONG W C, WONG K M, et al. 360 PPI flip-chip mounted active matrix addressable light emitting diode on silicon (LEDoS) micro-displays[J]. Journal of Display Technology, 2013, 9(8): 678-682.
- [12] DAY J, LI J, LIE D Y C, et al. Full-scale self-emissive blue and green micro-displays based on GaN micro-LED arrays[C]//Quantum Sensing and Nanophotonic Devices IX. San Francisco: SPIE, 2012: 82681X.
- [13] ZHANG H X, GU E, JEON C W, et al. Microstripe-array InGaN light-emitting diodes with individually addressable elements[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(15): 1681-1683.
- [14] MCKENDRY J J D, RAE B R, GONG Z, et al. Individually addressable AlInGaN micro-LED arrays with CMOS control and subnanosecond output pulses[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2009, 21(12): 811-813.
- [15] ZHANG S, MCKENDRY J, GONG Z, et al. Directly color-tunable smart display based on a CMOS-controlLED micro-LED array [C]//2012 IEEE Photonics Conference (IPC), Burlingame, CA: IEEE, 2012: 435-436.
- [16] LIU Z J, WONG K M, KEUNG C W, et al. Monolithic LEDmicrodisplay on active matrix substrate using flip-chip technology[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2009, 15(4): 1298-1302.
- [17] GRIFFIN C, ZHANG H, GUILHABERT B, et al. Micro-pixelated flip-chip InGaN and AlInGaN light-emitting diodes [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics. Baltimore, MD: IEEE, 2007: CMF2.
- [18] GONG Z, ZHANG H X, GU E, et al. Matrix-addressable micro-pixelated InGaN light-emitting diodes with uniform emission and increased light output [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2007, 54(10): 2650-2658.
- [19] CHONG W C, WONG K M, LIU, et al. A novel full-color 3LED projection system using R-G-B light emitting diodes on silicon (LEDoS) micro-displays[C]//SID Symposium Digest of Technical Papers. Hong Kong: Wiley-Blackwell, 2013, 44(1): 838-841.
- [20] LIU Z J, CHONG W C, WONG K M, et al. Investigation of forward voltage uniformity in monolithic light-emitting diode arrays[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(13): 1290-1293.
- [21] 包兴臻, 梁静秋, 梁中翥, 等. AlGaInP-LED 微阵列单元侧反射对出光效率的影响[J]. 液晶与显示, 2013, 28(5): 726-731.
- [22] GONG Z, GU E, JIN S R, et al. Efficient flip-chip InGaN micro-pixelated light-emitting diode arrays: promising candidates for micro-displays and colorconversion[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2008, 41(9): 094002.
- [23] 梁静秋, 李佳, 王维彪. LED 阵列的设计和制作工艺研究[J]. 液晶与显示, 2006, 21(6): 604-608.
- [24] GONG Z, LIU N Y, TAO Y B, et al. Electrical, spectral and optical performance of yellow-green and amber micro-pixelated InGaN light-emitting diodes[J]. Semiconductor Science and Technology, 2012, 27(1): 015003.
- [25] LIU Z J, CHONG W C, WONG K M, et al. GaN based light-emitting diode on silicon (LEDoS) micro-displays for BLU-free full-color projector application[C]//2013 IEEE Photonics Conference (IPC). Bellevue, WA: IEEE, 2013: 171-172.
- [26] XU J, RUZYLLLO J, SHANMUGASUNDARAM K, et al. Mist fabrication of quantum dot devices: U. S. Patent, 8222061[P]. 2012-7-17.
- [27] 梁静秋. 微显示器件的研究进展[J]. 光机电信息, 2010, 27(12): 21-27.
- [28] 王蓉, 刘玉玲, 余飞鸿. 微型投影仪的照明系统设计[J]. 光学仪器, 2006, 28(5): 46-51.

(编辑:程爱婕)