

文章编号: 1000-7032(2023)12-2242-08

# 交流驱动无电学接触 GaN 基 Micro-LED 器件光电特性

郭韞韵<sup>1</sup>, 翁书臣<sup>2</sup>, 邹振游<sup>2</sup>, 许海龙<sup>1</sup>,  
王浩楠<sup>1</sup>, 周雄图<sup>1,2</sup>, 吴朝兴<sup>1,2</sup>, 张永爱<sup>1,2\*</sup>

(1. 福州大学 物理与信息工程学院, 福建 福州 350116;  
2. 中国福建光电信息科学与技术创新实验室, 福建 福州 350108)

**摘要:** 针对 Micro-LED 器件微型化带来的尺寸效应、高速巨量转移、发光器件与驱动背板的高精度键合等问题, 本文通过金属有机化学气相沉积和原子层沉积技术制备了一种垂直结构的交流驱动无电学接触型 GaN 基 Micro-LED 器件, 研究了其光电特性。结果表明, 器件电路模型可等效为 RC 电路, 随着交流驱动信号频率的增大, 器件等效阻抗先快速减小后趋于稳定。当频率固定时, 器件  $I$ - $V$  特性呈线性关系, 器件等效阻抗稳定, 器件亮度随着驱动电压增大而增强。当驱动电压固定时, 器件在 16~22 MHz 频率范围内达到最大亮度, 且亮度随频率增加呈现先上升后下降趋势; 此外, 由于回路呈电容特性, 无电学接触型 Micro-LED 器件存在发光延迟效应和电流超前效应。对比传统 Micro-LED 器件, 无电学接触型 Micro-LED 器件与外部电极无电学接触, 在交流驱动条件下实现内部载流子复合发光, 有望解决 Micro-LED 芯片微型化带来的技术难题。

**关键词:** Micro-LED 器件; 氮化镓; 无电学接触; 交流驱动; 光电特性

中图分类号: TN303; TN304.2 文献标识码: A DOI: 10.37188/CJL.20230234

## Photoelectric Characteristics of AC-driven Non-electrical Contact GaN-based Micro-LED Device

GUO Yunyun<sup>1</sup>, WENG Shuchen<sup>2</sup>, ZOU Zhenyou<sup>2</sup>, XU Hailong<sup>1</sup>, WANG Haonan<sup>1</sup>,  
ZHOU Xiongtu<sup>1,2</sup>, WU Chaoxing<sup>1,2</sup>, ZHANG Yongai<sup>1,2\*</sup>

(1. College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;  
2. Fujian Science & Technology Innovation Laboratory for Optoelectronic Information of China, Fuzhou 350108, China)

\* Corresponding Author, E-mail: yongaizhang@fzu.edu.cn

**Abstract:** The miniaturization of Micro-LED devices presents a series of challenges, including size effects, high-speed mass transfer, and high-density bonding between light-emitting devices and driving backplanes. In this paper, an alternating current (AC)-driven non-electrical contact (NEC) GaN-based Micro-LED device was prepared by metal organic chemical vapor deposition (MOCVD) and atomic layer deposition (ALD) and its photoelectric characteristics were also investigated. The results indicate that the circuit model of NEC Micro-LED devices can be represented by an equivalent RC circuit. The equivalent impedance initially decreases rapidly and then stabilizes with increasing AC-driven signal frequency. When the signal frequency keeps constant, the current-voltage ( $I$ - $V$ ) curves exhibit linear relationships and the equivalent impedance remains stable. The luminance increases continuously with increasing working voltage. When the driving voltage remains constant, the luminance of the device initially rises and then falls with the gradual increase in frequency, reaching a maximum luminance in the frequency range of 16~22 MHz. Additionally, the luminescence of the device is delayed and there is a current leading effect due to the capacitive property of the circuit. Compared with the traditional Micro-LED devices, the NEC Micro-LED devices have non-

收稿日期: 2023-10-09; 修订日期: 2023-10-24

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB3600402); 闽都创新实验室自主部署项目(2021ZZ111, 2021ZZ130)

Supported by National Key R&D Program of China(2021YFB3600402); Fujian Science & Technology Innovation Laboratory for Optoelectronic Information of China(2021ZZ111, 2021ZZ130)

electrical contact with external electrodes and the luminescence of devices is attributed to inherent charge carriers under AC driving conditions. This development offers a promising solution to the technical challenges from the miniaturization of Micro-LED devices.

**Key words:** Micro-LED device; GaN; non-electrical contact; alternating-current drive; photoelectric characteristics

## 1 引 言

微型发光二极管(Micro-light emitting diode, Micro-LED)具有高亮度、易集成化、高分辨率、长寿命、低功耗和高响应速度等优点,有望成为下一代主流显示技术<sup>[1]</sup>。Micro-LED显示技术发展涵盖了微显示、中小尺寸显示和大尺寸商显<sup>[2-5]</sup>,在穿戴显示设备、5G超高清显示、微型显示、透明显示、柔性显示、AR/VR等领域具有广泛的应用场景<sup>[6-11]</sup>。

Micro-LED显示性能优异,但其商业化与产业化仍面临诸多技术挑战<sup>[12-16]</sup>。随着Micro-LED器件的微型化,一系列技术问题随之出现,如尺寸效应、高速巨量转移、发光器件与驱动背板的高精度键合等问题<sup>[17-18]</sup>。为了实现外部载流子的高效注入,传统Micro-LED器件外部驱动电极需与发光器件之间形成稳定的欧姆接触,这对发光器件与驱动背板的精准键合技术提出了极高的技术挑战<sup>[19-23]</sup>。此外,在载流子注入模式下,电压和电流的波动将会引起Micro-LED器件的亮度波动,从而影响显示质量<sup>[24-28]</sup>。为解决上述问题,研究者提出了一种无电学接触(Non-electrical contact, NEC)模式驱动氮化镓基(GaN)Micro-LED器件的全新技术方案<sup>[29-32]</sup>。2021年,Wang等提出一种采用聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)作为绝缘材料的无电学接触型 $\mu$ LED器件,实现了10~150 kHz、50~300 V<sub>pp</sub>条件下的稳定发光<sup>[33]</sup>;2022年,Li等提出一种单端电学接触型Micro-LED器件结构,有望应用于微显示检测<sup>[34]</sup>。目前,Micro-LED器件结构主要有垂直、倒装和正装结构,因此驱动电场可以选择垂直方向和水平方向。水平方向电场驱动的Micro-LED,电场两端的电场线相互平行;垂直方向电场驱动的Micro-LED,电场两端的电场线方向与器件垂直。与水平结构的Micro-LED器件相比,垂直结构的Micro-LED驱动电压更低,发光能力更稳定,亮度也更强。

因此,本文设计并制备了一种基于垂直结构的交流驱动NEC Micro-LED器件,在器件两端施

加交流驱动信号,研究NEC Micro-LED器件的光电性能。

## 2 实 验

本实验选用经过表面处理的蓝宝石衬底,利用金属有机化学气相沉积(Metal-organic chemical vapor deposition, MOCVD)、光刻技术和等离子体干法刻蚀制备Micro-LED器件,器件尺寸为37  $\mu$ m $\times$ 94  $\mu$ m。为了实现无电学接触,防止外部载流子注入器件,本实验采用原子层沉积技术(Atomic layer deposition, ALD)在Micro-LED芯片的p-GaN表面沉积一层高介电常数、高透明度的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>绝缘层。图1(a)为本实验垂直结构GaN基NEC Micro-LED器件结构示意图,图1(b)为NEC Micro-LED器件驱动示意图。从上至下分别为Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>绝缘层(15 nm)、p-GaN(0.65  $\mu$ m)、多量子阱(Multiple quantum wells, MQWs,)(141 nm)、n-GaN(2  $\mu$ m)、u-GaN(4  $\mu$ m)以及蓝宝石衬底,驱动信号施加在Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和蓝宝石衬底的两端。其中,MQWs势阱层In<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>N为3 nm,势垒层GaN为15 nm,共7个周期(7个阱8个垒)。图1(c)为NEC Micro-LED器件的SEM形貌图,图1(d)为器件表面Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜的原子力显微镜形貌图。从图中可以看出,Micro-LED芯片生长质量良好,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜平均粗糙度大约为2.6 nm,有利于NEC Micro-LED器件的交流驱动。

本实验利用功率放大器(Aigtek, ATA2161、ATA122D)与函数信号发生器(RIGOL, DG4162)产生正弦交流驱动信号,驱动电压峰峰值(V<sub>pp</sub>)最高可达1 600 V,频率最高可达22 MHz。采用示波器(RIGOL, DS7024)、高压差分探头(RIGOL, RP1025D)、光电倍增管(SENS-TECH, DM0090C)、雪崩光电探测器(Thorlabs, APD120A2/M)以及远方光谱仪采集器件的发光波形图像和光学性能。本实验全程在SCG真空探针台(SEMIS-HARE, SCG-0-2)上进行。实验中器件交流电压均为峰峰值(V<sub>pp</sub>),器件电流为交流峰值电流。

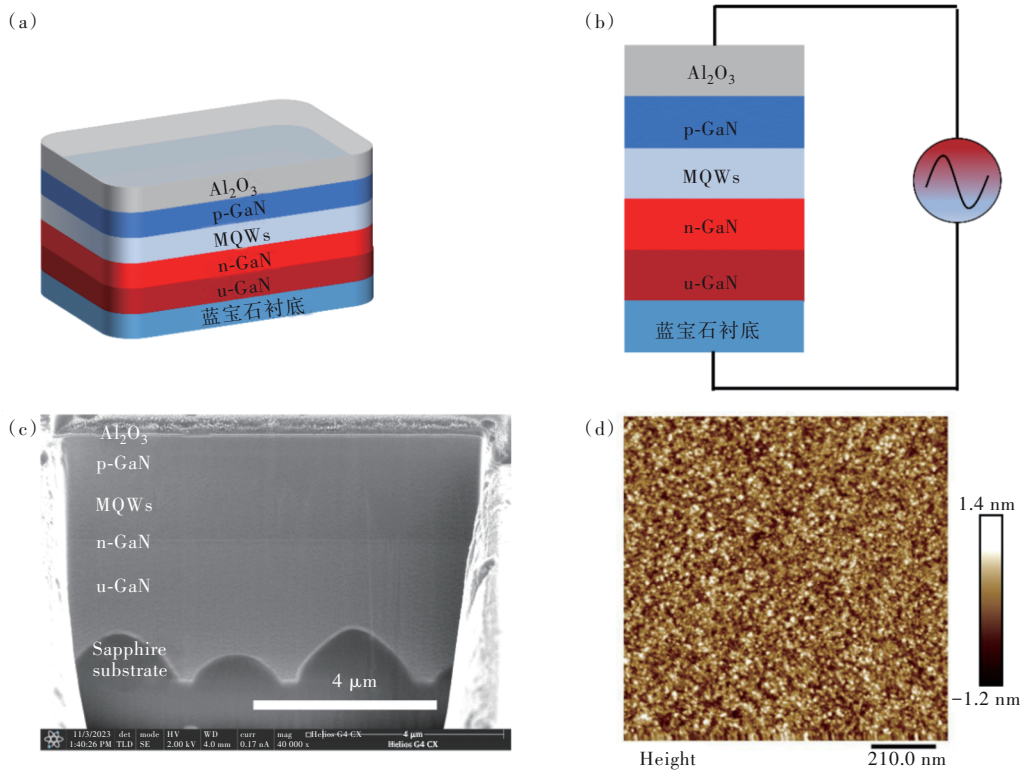


图 1 (a) NEC Micro-LED 器件结构示意图; (b) NEC Micro-LED 器件驱动示意图; (c) NEC Micro-LED 器件的 SEM 形貌图; (d)  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜的原子力显微镜图。

Fig. 1 (a) Schematic diagram of NEC GaN-based Micro-LED device. (b) Driving model of the device. (c) SEM image of NEC Micro-LED devices. (d) AFM image of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  thin film.

### 3 结果与讨论

#### 3.1 直流和交流驱动 Micro-LED 器件的光电特性

图 2 为传统 Micro-LED 器件在直流和交流驱动下的光电特性曲线。图 2(a) 为直流驱动 Micro-LED 器件的伏安特性 (Current-voltage,  $I$ - $V$ ) 曲线, 定义 Micro-LED 器件开始发光时的电压为 Micro-LED 器件的开启电压。当器件处于反向偏置时, 反向电流几乎为 0 A。当器件处于正向偏置时, 该器件的开启电压为 5 V 左右, 在电压小于开启电压时, 器件的电流趋近于 0 A; 当电压大于开启电压时, 随电压的增大, 电流呈指数增长趋势, 当电压大于 15 V 时 Micro-LED 器件会被击穿。图 2(b) 为 Micro-LED 器件的相对亮度-电压特性曲线, 为了降低环境光对测试结果的影响, 对亮度进行归一化处理。当电压大于开启电压时, 器件的亮度随着电压的增大呈指数增长, 与其  $I$ - $V$  特性曲线的变化趋势基本相同。

图 2(c) 为传统 Micro-LED 器件在交流驱动下的  $I$ - $V$  特性曲线。从图中可以看出, Micro-LED 器

件的  $I$ - $V$  特性曲线接近线性。在不同频率下对 Micro-LED 器件的开启电压进行测试, 结果如图 2(d) 所示。从图中可看出, 交流驱动模式下的 Micro-LED 器件开启电压大于直流驱动模式下的开启电压, 与频率变化呈正相关, 且在较高的频率范围内 (50 kHz~2 MHz), 开启电压与频率呈线性关系。图 2(e) 为 1 kHz 频率下, 在不同电压下 Micro-LED 器件的亮度变化曲线。当驱动电压大于开启电压, 其发光亮度与电压呈正相关, 且升高的趋势趋于线性, 与  $I$ - $V$  特性曲线的趋势类似。图 2(f) 为传统 Micro-LED 器件在交流驱动模式下的相对亮度-频率特性曲线。从图中可以看出, 当频率为 100 Hz 时, Micro-LED 器件亮度达到最大亮度值的 90.3%, 且在 100 Hz~20 kHz 的频率范围内, 器件亮度一直保持大于最大亮度值的 90%; 当频率大于 20 kHz, 器件发光性能开始减弱; 当频率达到 80 kHz 附近时, 器件基本不发光。这是因为随着频率的升高, 载流子无法充分复合发光, 最终导致器件亮度极低。因此, Micro-LED 器件在较低频率下就能发挥出器件的发光性能, 且在一个较大的频率范围内都能保持 90% 以上的发光亮

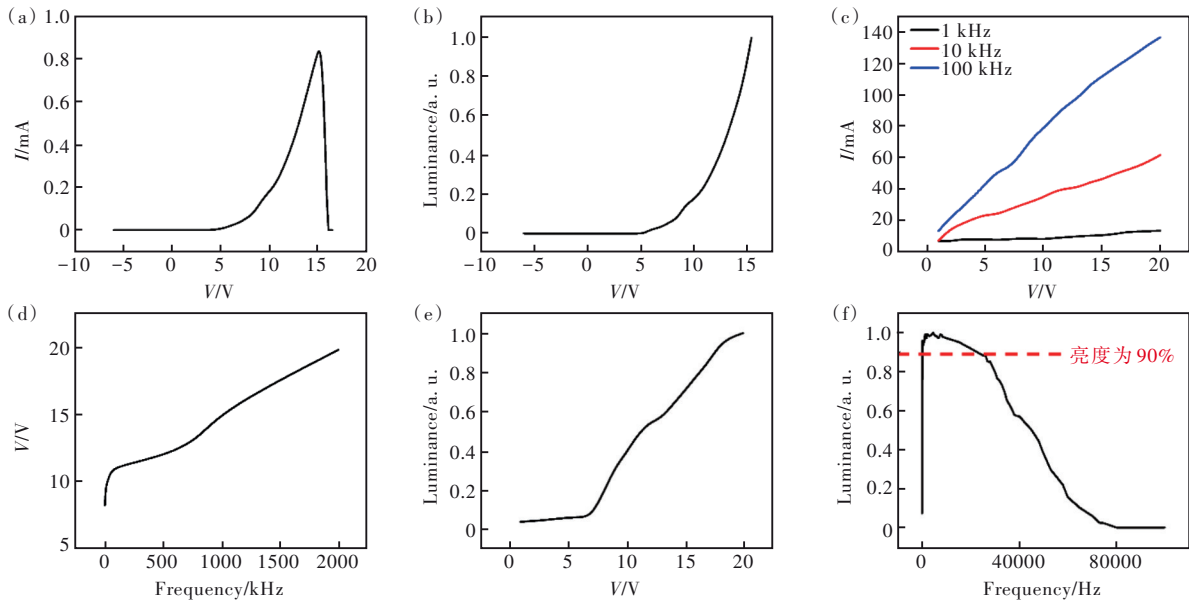


图2 Micro-LED的直流光电特性曲线:(a) $I$ - $V$ 特性,(b)相对亮度-电压特性。Micro-LED的交流光电特性曲线:(c) $I$ - $V$ 特性,(d)开启电压-频率特性,(e)亮度-电压特性,(f)相对亮度-频率特性。

Fig.2 Photoelectric performance of Micro-LED device in DC mode: (a) $I$ - $V$  curves at different frequencies, (b) relative luminance *versus* voltage. Photoelectric performance of Micro-LED device in AC mode: (c) $I$ - $V$  curve, (d) opening voltage *versus* frequency, (e) luminance *versus* voltage, (f) relative luminance *versus* frequency.

度,但超过这个范围,器件发光性能开始减弱,直至无法发光。

在直流驱动和交流驱动模式下,通过研究传统 GaN 基 Micro-LED 器件的光电特性,有助于开展垂直结构型 GaN 基 NEC Micro-LED 器件的性能研究。

### 3.2 NEC Micro-LED 器件的光电特性

#### 3.2.1 电学特性

垂直结构 NEC Micro-LED 器件的 RC (Resistor-capacitance, RC) 等效电路如图 3(a) 所示。其中  $R_{\text{external}}$  为与器件串联的一个外部电阻,  $C_1$ 、 $C_2$  为 Micro-LED 与绝缘层之间的等效电容,  $C_{\text{LED}}$  为与 p-

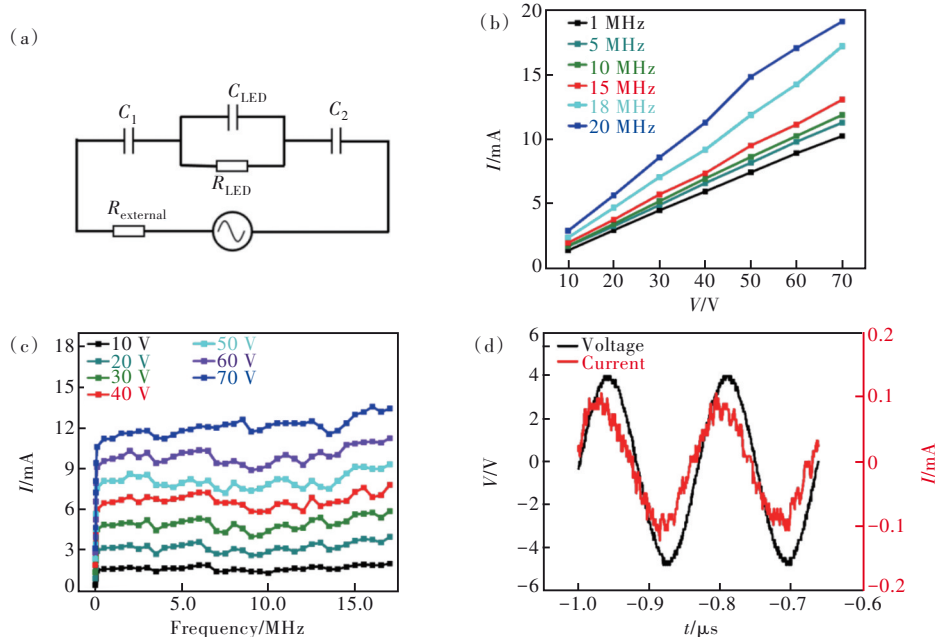


图3 (a)交流驱动 NEC Micro-LED 器件的等效电路;(b) $I$ - $V$ 特性曲线;(c)电流-频率曲线;(d)电流超前效应。

Fig.3 (a)Equivalent circuit model of AC-driven NEC Micro-LED. (b) $I$ - $V$  curves at different frequencies. (c)Current-frequency curves in different applied voltages. (d)Current leading effect.



n 结有关的电容,  $R_{LED}$  为体半导体和 MQWs 的电阻。由于绝缘层的存在, 器件的电路模型可等效为电阻电容并联电路。

图 3(b) 为器件在不同频率下的  $I-V$  特性曲线。从图中可以看出, 器件的  $I-V$  特性曲线趋于线性。当频率固定时, NEC Micro-LED 器件的阻抗稳定, 不随工作电压的变化而改变。实验中 Micro-LED 器件在直流驱动下的击穿电压在 15 V 左右, 而在电压为 70 V<sub>pp</sub> 甚至更高时, NEC Micro-LED 器件仍可正常工作。这说明 NEC Micro-LED 器件的耐高压能力比传统 Micro-LED 器件强。图 3(c) 为不同电压驱动下, 交流驱动 NEC Micro-LED 器件的电流-频率曲线。随着频率的增加, 电流先快速增大, 随后趋于平稳, 稳定时所能达到的最大电流为 12 mA 左右。即随着驱动信号频率的增大, 器件等效阻抗先快速减小后趋于稳定。由于 NEC Micro-LED 器件具有电容特性<sup>[35]</sup>, 当交流正弦信号驱动时, 流经器件的电流和作用在器件两端的电压存在着相位差。通过采集器件两端的电压和回路的电流, 实验结果如图 3(d), 从图中可以看出, 电流波峰超前于电压波峰, 这说明 NEC Micro-LED 器件的电路存在电流超前效应。

### 3.2.2 光学特性

在直流和交流驱动模式下, 传统 Micro-LED 器件发光机理均是通过电极注入空穴和电子实现连续的电致发光。由于绝缘层阻挡了外部载流子的注入, NEC Micro-LED 器件只利用器件内部固有的载流子复合发光。在交流电场的驱动下, 器件内部的载流子向 MQWs 漂移, 并在 MQWs 内周期性地复合发光<sup>[31-33]</sup>。因此, 驱动信号的频率和电压幅度会直接影响 NEC Micro-LED 器件的发光特性。

利用光电倍增管采集 NEC Micro-LED 器件产生的光子数, 探究 NEC Micro-LED 器件的亮度-频率特性曲线, 实验结果如图 4(a) 所示。当信号电压固定时, 随着频率逐渐增加, 器件亮度呈现先增大后减小的趋势。实验中, 当器件亮度达到最大值时所对应的频率定义为器件最佳频率。当频率高于最佳频率时, 器件发光亮度骤降直至为 0。因为当频率过高时, 驱动电场转向过快, 载流子还未复合而电场方向已经改变, 严重影响了器件内部载流子辐射复合效率。此外, 从图中可以看出, 电压幅度也会影响 NEC Micro-LED 器件亮度。

图 4(b) 为最佳频率下的 NEC Micro-LED 器件

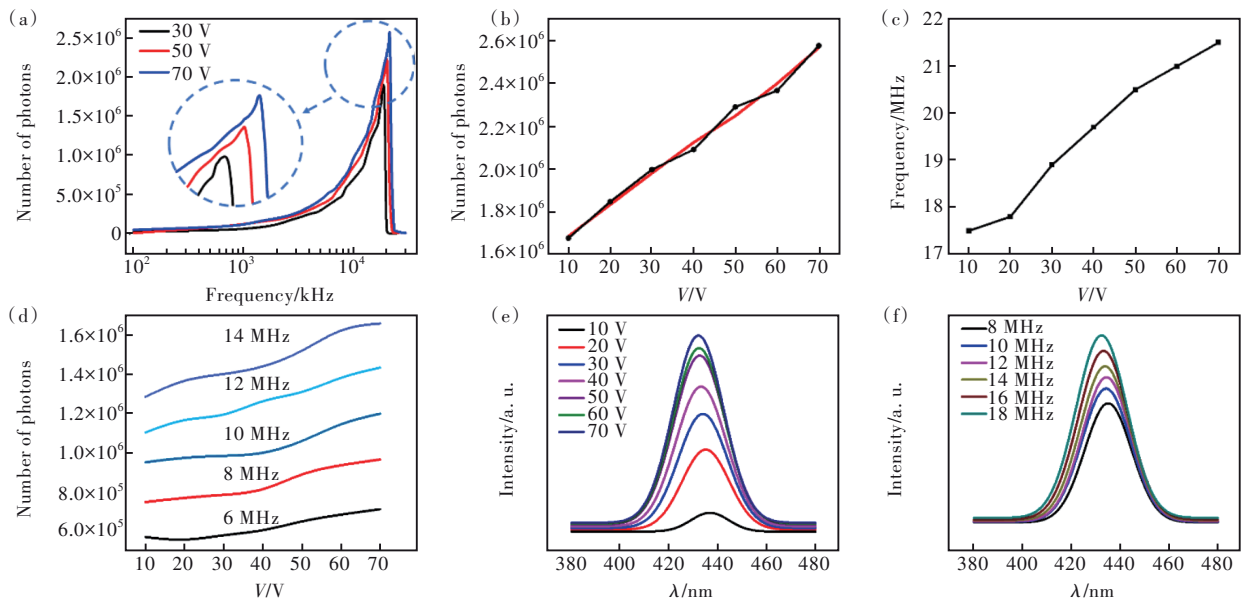


图 4 NEC Micro-LED 器件的光学特性曲线。(a)亮度-频率特性曲线;(b)亮度-电压曲线(其中红色曲线为线性拟合所得);(c)最佳频率-电压曲线;(d)亮度-电压特性曲线;(e)发光波长随电压变化曲线;(f)发光波长随频率变化曲线。

Fig.4 Optical characteristic curves of NEC Micro-LED. (a)Luminance versus frequency in different applied voltages. (b)Luminance versus voltage(the red curve is obtained by linear fitting). (c)Optimum frequency-voltage curves. (d)Luminance versus voltage at different frequencies. (e)Electroluminescence spectra at different voltages. (f)Electroluminescence spectra at different frequencies.

亮度与电压变化曲线, 器件最大亮度与电压呈线性关系。图 4(c) 为 NEC Micro-LED 器件的最佳频率与电压变化曲线, 从图中可看出, NEC Micro-LED 器件的最佳频率随着电压的增大而增大。这说明驱动电压大小影响了器件的发光特性, 驱动电压越大, 越有利于激发 NEC Micro-LED 器件的复合发光, 器件最佳频率也随之升高。图 4(d) 是 NEC Micro-LED 器件亮度随电压变化曲线。从图中可以看出, 当频率固定时, 驱动电压越大, 器件亮度就越强。因为电场强度增大, 器件内部载流子辐射复合的速度变快, 载流子复合数量越多, 器件亮度越高。但是过大的电压可能会击穿器件, 所以驱动电压不宜过大。

图 4(e) 为不同电压下 ( $10 \sim 70 V_{pp}$ ) 器件的电致发光光谱。从图中可看出, 随着电压增大, 器件峰值波长出现蓝移现象, 峰值波长从  $436.80 \text{ nm}$  偏移至  $432.07 \text{ nm}$ , 偏移了  $4.73 \text{ nm}$  左右。图 4(f) 为不同频率下 ( $8 \sim 18 \text{ MHz}$ ) 器件的电致发光光谱。随着频率增大, 器件峰值波长出现蓝移现象, 峰值波长从  $435.05 \text{ nm}$  移动至  $432.35 \text{ nm}$ , 器件的峰值波长偏移了  $2.7 \text{ nm}$  左右。

通过雪崩光电探测器和示波器分别采集相对亮度和驱动电压信号, 图 5 为交流驱动 NEC Micro-LED 器件的发光波形与电压曲线, 其中红色曲线为相对亮度变化曲线, 黑色曲线为驱动电压信号, 插图为器件发光照片。驱动信号的频率为  $10 \text{ MHz}$ 、电压幅度为  $15 V_{pp}$ 。从图中可以看出, 在一个正弦交流信号周期里, NEC Micro-LED 器件只发光一次且仅在正半周期发光。

在正弦交流信号的正半周期, NEC Micro-LED 器件内部的载流子向 MQWs 漂移, 并在

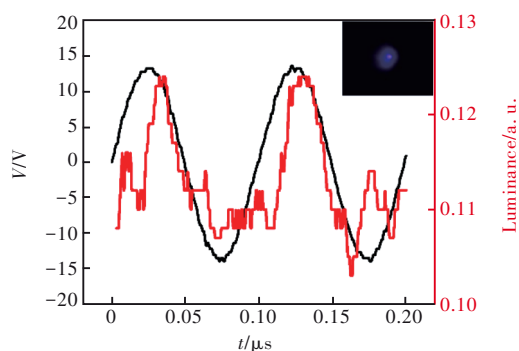


图 5 交流驱动 NEC Micro-LED 器件的发光波形与电压曲线, 插图为器件发光照片。

Fig.5 Luminescence and voltage waveform of the AC-driven device. The inset is a luminous image of the device.

MQWs 内辐射复合发光。同时, 多数载流子的漂移会产生一个方向与驱动电场相反的感生电场, 抑制载流子的扩散, 最终终止辐射复合过程。在正弦交流信号的负半周期, 正半周期形成的感生电场被消除, 器件内部的载流子逐渐回到平衡状态, 为下一个发光周期做准备。因此在周期性变化的信号驱动下, NEC Micro-LED 器件能保持稳定的周期性电致发光<sup>[36-38]</sup>。

此外, 从实验结果可以发现, NEC Micro-LED 器件的发光波形滞后于驱动电压信号, 存在发光延迟效应。这说明电荷需先在器件两端的绝缘层累积并形成电场, 随后驱动器件内部载流子运动至 MQWs 复合发光。

## 4 结 论

本文设计了一种垂直结构的交流驱动 NEC Micro-LED 器件, 通过 MOCVD 和 ALD 技术成功制备了 NEC Micro-LED 器件, 并研究了其光电特性。与常规 Micro-LED 器件不同, 蓝宝石衬底和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  绝缘层使得 NEC Micro-LED 器件与外部电极之间无电学接触, 在交流驱动条件下只利用器件内部固有的载流子辐射复合发光。当器件两端施加交流驱动信号时, 该器件的电路模型可等效为 RC 电路。随着交流驱动信号频率增大, 器件等效阻抗先快速减小后趋于稳定。当驱动信号频率固定时, 器件  $I$ - $V$  特性曲线呈线性关系, 器件等效阻抗稳定, 发光亮度随驱动电压的增大而增强。而当驱动信号电压固定时, 器件发光亮度随频率逐渐增加呈现先上升后下降的趋势, 在  $16 \sim 22 \text{ MHz}$  频率范围内达到最大亮度。此外, 回路呈电容特性, NEC Micro-LED 器件存在电流超前效应与发光延迟效应。综上, 与传统 Micro-LED 器件相比, NEC Micro-LED 器件与外部驱动电路不需形成欧姆接触, 即可在交流驱动信号下实现内部载流子的周期性复合发光, 有望解决 Micro-LED 微型化带来的巨量转移与高精度键合、发光芯片与驱动电极高稳定性接触等技术问题, 为未来 Micro-LED 显示技术发展提供了新思路。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址: <http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20230234>.

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] WIERER J J JR, TANSU N. III-nitride micro-LEDs for efficient emissive displays [J]. *Laser Photon. Rev.*, 2019, 13 (9): 1900141.
- [ 2 ] WU Y F, MA J S, SU P, *et al.* Full-color realization of micro-LED displays [J]. *Nanomaterials (Basel)*, 2020, 10 (12): 2482.
- [ 3 ] MCKENDRY J J D, MASSOUBRE D, ZHANG S L, *et al.* Visible-light communications using a CMOS-controlled micro-light-emitting-diode array [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2012, 30 (1): 61-67.
- [ 4 ] PATHAK P H, FENG X T, HU P F, *et al.* Visible light communication, networking, and sensing: a survey, potential and challenges [J]. *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, 2015, 17 (4): 2047-2077.
- [ 5 ] WASISTO H S, PRADES J D, GÜLINK J, *et al.* Beyond solid-state lighting: miniaturization, hybrid integration, and applications of GaN nano-and micro-LEDs [J]. *Appl. Phys. Rev.*, 2019, 6 (4): 041315.
- [ 6 ] LEE H E, SHIN J H, PARK J H, *et al.* Micro light-emitting diodes for display and flexible biomedical applications [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2019, 29 (24): 1808075.
- [ 7 ] MICKLE A D, WON S M, NOH K N, *et al.* A wireless closed-loop system for optogenetic peripheral neuromodulation [J]. *Nature*, 2019, 565 (7739): 361-365.
- [ 8 ] DAY J, LI J, LIE D Y C, *et al.* III-nitride full-scale high-resolution microdisplays [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, 99 (3): 031116.
- [ 9 ] ZAROWNA-DABROWSKA A, NEALE S L, MASSOUBRE D, *et al.* Miniaturized optoelectronic tweezers controlled by GaN micro-pixel light emitting diode arrays [J]. *Opt. Express*, 2011, 19 (3): 2720-2728.
- [ 10 ] RASHIDI A, MONAVARIAN M, ARAGON A, *et al.* High-speed nonpolar InGaN/GaN LEDs for visible-light communication [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2017, 29 (4): 381-384.
- [ 11 ] ZHAO C X, LI W Z, YAN G W, *et al.* Application of micro-LED in visible light communication [J]. *SID Symp. Dig. Tech. Papers*, 2020, 51 (S1): 117-120.
- [ 12 ] PARANJPE A, MONTGOMERY J, LEE S M, *et al.* Micro-LED displays: Key manufacturing challenges and solutions [J]. *SID Symp. Dig. Tech. Papers*, 2018, 49 (1): 597-600.
- [ 13 ] 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]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2021, 36 (8): 1101-1112. (in Chinese)
- [ 14 ] HUANG Y G, TAN G J, GOU F W, *et al.* Prospects and challenges of mini-LED and micro-LED displays [J]. *J. Soc. Inf. Disp.*, 2019, 27 (7): 387-401.
- [ 15 ] ZHAO Q, MIAO J, ZHOU S, *et al.* High-power GaN-based vertical light-emitting diodes on 4-inch silicon substrate [J]. *Nanomaterials*, 2019, 9 (8): 1178.
- [ 16 ] VIREY E H, BARON N, BOUHAMRI Z. 11-3: Overlooked challenges for microLED displays [J]. *SID Symp. Dig. Tech. Papers*, 2019, 50 (1): 129-132.
- [ 17 ] TIAN P F, MCKENDRY J J D, GONG Z, *et al.* Size-dependent efficiency and efficiency droop of blue InGaN micro-light emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 101 (23): 231110.
- [ 18 ] KONOPLEV S S, BULASHEVICH K A, KARPOV S Y. From large-size to Micro-LEDs; scaling trends revealed by modeling [J]. *Phys. Status Solidi (A) Appl. Mater. Sci.*, 2018, 215 (10): 1700508.
- [ 19 ] HATADA K, FUJIMOTO H, OCHI T, *et al.* LED array modules by new technology microbump bonding method [J]. *IEEE Trans. Compon. Hybrids Manuf. Technol.*, 1990, 13 (3): 521-527.
- [ 20 ] WANG S W, HONG K B, TSAI Y L, *et al.* Wavelength tunable InGaN/GaN nano-ring LEDs via nano-sphere lithography [J]. *Sci. Rep.*, 2017, 7: 42962.
- [ 21 ] ANZI L, MANSOURI A, PEDRINAZZI P, *et al.* Ultra-low contact resistance in graphene devices at the Dirac point [J]. *2D Mater.*, 2018, 5 (2): 025014.
- [ 22 ] HORNG R H, CHIEN H Y, CHEN K Y, *et al.* Development and fabrication of AlGaInP-based flip-chip micro-LEDs [J]. *IEEE J. Electr. Dev. Soc.*, 2018, 6: 475-479.

- [ 23 ] LIU Y B, ZHANG K, HYUN B R, *et al.* High-brightness InGaN/GaN micro-LEDs with secondary peak effect for displays [J]. *IEEE Electr. Dev. Lett.*, 2020, 41 (9): 1380-1383.
- [ 24 ] CHEN P Q, WANG K, CHEN J J, *et al.* Achieving wide operating voltage windows in non-carrier injection micro-LEDs for enhancing luminance robustness [J]. *IEEE Trans. Electr. Dev.*, 2022, 69 (1): 212-215.
- [ 25 ] STEINEL T, WOLF M. Bringing true colors to MicroLED displays [J]. *Inf. Display*, 2020, 36 (3): 19-23.
- [ 26 ] KIM K, LIM T, KIM C, *et al.* High-precision color uniformity based on 4D transformation for micro-LED [C]. *Proceedings of SPIE 11302, Light-emitting devices, Materials, and Applications XXIV, San Francisco*, 2020: 113021U.
- [ 27 ] KIM S J. Improvement of GaN-based light-emitting diode by indium-tin-oxide transparent electrode and vertical electrode [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, 17 (8): 1617-1619.
- [ 28 ] WANG X, ZHANG X Y, GU X Q, *et al.* A bright and stable violet carbon dot light-emitting diode [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2020, 8(15): 2000239.
- [ 29 ] LIU Y, WANG K, WU C X, *et al.* Triboelectric-nanogenerator-inspired light-emitting diode-in-capacitors for flexible operation in high-voltage and wireless drive modes [J]. *Nano Energy*, 2020, 78: 105281.
- [ 30 ] WU C X, WANG K, ZHANG Y A, *et al.* Emerging nanopixel light-emitting displays: significance, challenges, and prospects [J]. *J. Phys. Chem. Lett.*, 2021, 12 (14): 3522-3527.
- [ 31 ] WANG K, LIU Y, WU C X, *et al.* Electroluminescence from  $\mu$ LED without external charge injection [J]. *Sci. Rep.*, 2020, 10 (1): 8059.
- [ 32 ] 许海龙, 陈孔杰, 陈培崎, 等. 无电学接触型氮化镓基 Micro-LED 器件光电性能 [J]. *发光学报*, 2022, 43 (10): 1592-1600.  
XU H L, CHEN K J, CHEN P Q, *et al.* Photoelectric characteristics of non-electric contact GaN-based micro-LED device [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2022, 43 (10): 1592-1600. (in Chinese)
- [ 33 ] WANG K, CHEN P Q, CHEN J J, *et al.* Alternating current electroluminescence from GaN-based nanorod light-emitting diodes [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2021, 140: 107044.
- [ 34 ] 李俊龙, 李文豪, 苏昊, 等. 面向 Micro-LED 驱动与检测的单端注入电致发光机理 [J]. *发光学报*, 2022, 43 (12): 1991-2000.  
LI J L, LI W H, SU H, *et al.* Single-terminal injection electroluminescence mechanism for micro-LED driving and detection [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2022, 43 (12): 1991-2000. (in Chinese)
- [ 35 ] 陈焕庭, 吕毅军, 陈忠, 等. 基于电容和电导特性分析 GaN 蓝光发光二极管老化机理 [J]. *物理学报*, 2009, 58 (8): 5700-5704.  
CHEN H T, LÜ Y J, CHEN Z, *et al.* Analysis of degradation mechanism of GaN blue light emitting diode by the characteristics of capacitance and conductance [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2009, 58 (8): 5700-5704. (in Chinese)
- [ 36 ] WANG K, LIU Y, CHEN R, *et al.* Light-pulse splitting from nano-light-emitting diodes operating in noncarrier injection mode [J]. *IEEE Electr. Dev. Lett.*, 2021, 42 (7): 1033-1036.
- [ 37 ] LI W H, WANG K, LI J L, *et al.* Working mechanisms of nanoscale light-emitting diodes operating in non-electrical contact and non-carrier injection mode: modeling and simulation [J]. *Nanomaterials (Basel)*, 2022, 12 (6): 912.
- [ 38 ] LI W H, WANG K, LIAO Y T, *et al.* Device simulation on GaN-LED operating in noncarrier injection mode for performance improvement by enhancing the tunneling effect in multiquantum wells [J]. *Adv. Electron. Mater.*, 2023, 9 (8): 2300298.



郭韞韵 (1999-), 女, 江西吉安人, 硕士研究生, 2020 年于南京邮电大学获得学士学位, 主要从事交流驱动发光器件的研究。  
E-mail: 740418306@qq.com



张永爱 (1977-), 男, 江西吉安人, 博士, 研究员, 博士生导师, 2011 年于福州大学获得博士学位, 主要从事 Micro-LED 显示、纳米像元电致发光 (NLED) 显示等领域的研究。  
E-mail: yongaizhang@fzu.edu.cn