

文章编号: 1000-7032(2022)12-1991-10

面向 Micro-LED 驱动与检测的单端注入电致发光机理

李俊龙¹, 李文豪¹, 苏昊¹, 邱佳雯¹, 王堃^{1*}, 张永爱^{1,2},
周雄图^{1,2}, 吴朝兴^{1,2*}, 郭太良^{1,2}

(1. 福州大学物理与信息工程学院, 福建福州 350108; 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: Micro-LED具有高分辨率、高色域、高稳定性等优点,在近眼显示领域具有广阔的应用前景。然而, Micro-LED存在着巨量电致发光检测和巨量金属键合两大技术瓶颈。本文提出了一种单端载流子注入的 Micro-LED工作模式,并制备了一种基于该工作模式的 Micro-LED器件,即单注入型 Micro-LED。通过实验和仿真研究单注入型 Micro-LED的工作过程,探究其工作机理。研究了单注入型 Micro-LED在正弦交流电下的电流-驱动电压关系、电流-驱动频率关系、亮度-驱动频率关系,以及能带的周期性变化规律,并提出单注入型 Micro-LED的载流子输运模型。最后,展示了单注入模式在垂直结构 Micro-LED检测领域的应用,为 Micro-LED检测提供了新思路。

关键词: Micro-LED; 单端载流子注入; 电致发光检测; 交流电

中图分类号: TN312⁺.8

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20220270

Single-terminal Injection Electroluminescence Mechanism for Micro-LED Driving and Detection

LI Jun-long¹, LI Wen-hao¹, SU Hao¹, QIU Jia-wen¹, WANG Kun^{1*}, ZHANG Yong-ai^{1,2},
ZHOU Xiong-tu^{1,2}, WU Chao-xing^{1,2*}, GUO Tai-liang^{1,2}

(1. College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. Fujian Science & Technology Innovation Laboratory for Optoelectronic Information of China, Fuzhou 350108, China)

* Corresponding Authors, E-mail: 211110018@fzu.edu.cn; chaoxing_wu@fzu.edu.cn

Abstract: Micro light-emitting diode (Micro-LED), with many advantages such as high-resolution, high color gamut, and high stability, has broad prospects for near-eye display. However, two major technical issues in Micro-LED need to be solved, including mass electroluminescence detection and mass metal bonding. In this work, a working mode for Micro-LED with single-terminal carrier-injection is proposed, and a single-injection type Micro-LED related to the working mode is fabricated. The working process is studied by experiments and simulations in order to explore the working mechanisms. The current-voltage, current-frequency, brightness-frequency relationship and the periodic variation of the energy band of single-injection type Micro-LED under sinusoidal alternating current are studied. Moreover, the carrier transport model of single-injection Micro-LED is proposed. Finally, the application of single-injection mode used in the detection of vertical structure Micro-LED is demonstrated, which provides new ideas for Micro-LED detection.

Key words: Micro-LED; single-terminal carrier-injection; electroluminescence detection; alternating current

收稿日期: 2022-07-09; 修订日期: 2022-08-01

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB3600404)资助项目

Supported by National Key Research Development Program of China(2021YFB3600404)

1 引 言

微显示器件是近眼显示技术的关键组件,是实现信息交换和智能化的关键环节,其要求显示屏具有更小尺寸的像素、超高的分辨率、更好的显示效果^[1-5]。在众多微显示技术中, Micro-LED 显示凭借其自发光、高效率、低功耗、高集成度、高稳定性等优点,具有比液晶显示和有机发光二极管显示更优异的显示效果,有望成为主流的微显示技术^[6-9]。与普通的 LED 芯片类似, Micro-LED 芯片的发光依赖于外部注入电子、空穴的辐射复合^[10]。因此, Micro-LED 芯片的 p 端、n 端电极需要分别与外部驱动线路形成高质量电气连接,即实现 Micro-LED 芯片的双端接触与双端载流子注入。正是这种双端接触与双端注入原理导致了高分辨率 Micro-LED 显示屏在制备过程中面临着包括巨量电致发光检测和巨量金属键合在内的两个技术瓶颈^[11-12]。一方面,对于晶圆级 Micro-LED 的巨量电致发光检测,其关键技术是实现 Micro-LED 芯片中微型电极对(n 电极与 p 电极)与两根微型探针的快速、精准接触^[13-14]。然而,随着 Micro-LED 芯片的不断缩小,微型探针的针尖直径也必须相应地缩小至几微米。这对针尖的加工工艺、使用寿命提出更高要求,同时也对检测设备位移部件的精度与移动速度提出了更高要求。另一方面,对于 Micro-LED 显示屏的设计制备,其关键技术之一是如何实现 Micro-LED 芯片中微型电极对(n 电极与 p 电极)与相应驱动线路的高质量电气连接^[15-17]。然而, Micro-LED 芯片尺寸的不断缩小和显示屏像素分辨率的不断提高对 Micro-LED 常用的金属凸点键合技术提出了更高要求^[18-20]。受限于键合设备精度,要实现 Micro-LED 芯片电极对与驱动线路焊盘精准连接与键合依然存在很大的技术难度^[21-22]。立足于新原理与新效应研发新技术是突破巨量电致发光检测和巨量金属键合瓶颈的有效途径。

本文提出了一种应用于 Micro-LED 驱动与电致发光检测的单端接触与单端载流子注入(以下简称单注入)新机理,打破 Micro-LED 芯片常规的双端接触双端载流子注入模式。与常规 Micro-LED 芯片不同的是,单注入型 Micro-LED 与外部驱动引线之间仅存在单端的电学接触,即只需 Micro-LED 芯片的一个电极与外部引线电极连

接,而 Micro-LED 芯片的另一端采用绝缘层与外部电极隔离开。为了保证单端注入也可以实现稳定的发光,我们利用交流电场驱动载流子周期性的单端注入,从而保证 Micro-LED 芯片能够实现稳定的周期性发光。单注入型工作模式使得 Micro-LED 芯片与外部引线(探针)的接触点数量由两个降低至一个,这可以降低电致发光检测和凸点金属键合工艺要求。本文研究单注入型 Micro-LED 的光电特性,包括电流-驱动电压关系、电流-驱动频率关系、亮度-驱动频率关系等,展示了单注入模式在 Micro-LED 检测中的应用。基于以上分析测试,提出了单注入型 Micro-LED 的工作机理模型。本研究有望为 Micro-LED 芯片的检测、Micro-LED 显示屏的设计提供一种新思路。

2 实 验

2.1 单注入型 Micro-LED 器件制备

本实验采用的 Micro-LED 芯片为自支撑 Micro-LED,由厦门乾照光电提供。采用的器件样品结构从下至上分别为:置于底层的氧化钢锡(Indium tin oxide, ITO)下电极,ITO 上光刻后形成的环形光刻胶限位区,转移至 ITO 表面的自支撑 Micro-LED 芯片,聚对苯二甲酸乙二醇酯(Polyethylene terephthalate, PET)绝缘层,ITO 上电极。该器件制备过程如下:在 ITO 上旋涂光刻正胶(低速 500 r/min,时间 5 s;高速 2 500 r/min,30 s,厚度 3 μm),在 ITO 玻璃板上刻蚀出环形 ITO 限位区(160 $\mu\text{m}\times 60 \mu\text{m}$)。通过探针将自支撑 Micro-LED 芯片转移至限位区。将 125 μm 厚的 PET 绝缘层覆盖在沉积有 Micro-LED 芯片的基板上,最后在 PET 绝缘层上设置 ITO 上电极。因此,在该结构中, Micro-LED 芯片与底部 ITO 电极之间存在电学接触,而与顶部 ITO 电极无直接电学接触。

2.2 基于单注入模式的 Micro-LED 检测系统构建

本实验中基于单注入模式的 Micro-LED 检测系统组成如下:透明导电的样品座,位于样品座底部的显微镜头,用于垂直结构 Micro-LED 芯片检测的探针,交流驱动电源。首先将制备在蓝宝石衬底上的垂直结构 Micro-LED 芯片放置在样品座上,交流电源的一个输出连接探针,另一输出连接样品座,探针与 Micro-LED 芯片的 p 电极形成稳定的电气连接,形成单注入模式的 Micro-LED。其次,显微镜对 Micro-LED 发光状态进行采集,实现

Micro-LED 的发光检测。

2.3 测试仪器

在测试过程中,交流信号由函数波形发生器(RIGOL DG4162)和功率放大器(Aigtek A122D)产生;输出电压和电流由示波器(RIGOL DS7024)记录,记录的交流电压为峰峰值(V_{pp}),记录的交流电流为最大值;发光亮度由亮度计(NBeTFZ400)测量;发光响应速度由雪崩光电探测器(Thorlabs APD120A2/M)测量;光学显微镜照片由倒置显微镜(DIANYING DYJ-201)采集,。

3 结果与讨论

3.1 单注入 Micro-LED 器件结构

本实验采用的 Micro-LED 芯片为自支撑 Micro-LED,即从蓝宝石衬底剥离的 LED 芯片。使用

自支撑 Micro-LED 芯片可保证所有的 LED 芯片工作在单注入模式,并且通过去除蓝宝石衬底可以有效降低工作电压。该芯片从上至下分别为 p-GaN、量子阱发光层、n-GaN,芯片尺寸为 $40\ \mu\text{m} \times 40\ \mu\text{m}$,厚度为 $7\ \mu\text{m}$,如图 1(a)所示。单注入型 Micro-LED 器件如图 1(b)所示,从下至上分别为:ITO 下电极、ITO 上的环形光刻胶限位区、转移至 ITO 表面的自支撑 Micro-LED 芯片、PET 绝缘层、ITO 上电极,其中器件上下电极之间距离 $132\ \mu\text{m}$ 。该结构中的环形光刻胶限位区用于固定自支撑 Micro-LED 芯片,并且使得 PET 绝缘层能够平整地在 Micro-LED 与环形光刻胶限位区平面上成膜,保证了绝大多数的电场能够均匀地作用于 Micro-LED 芯片。PET 绝缘层用于阻挡载流子的传输,形成单注入型 Micro-LED 器件。

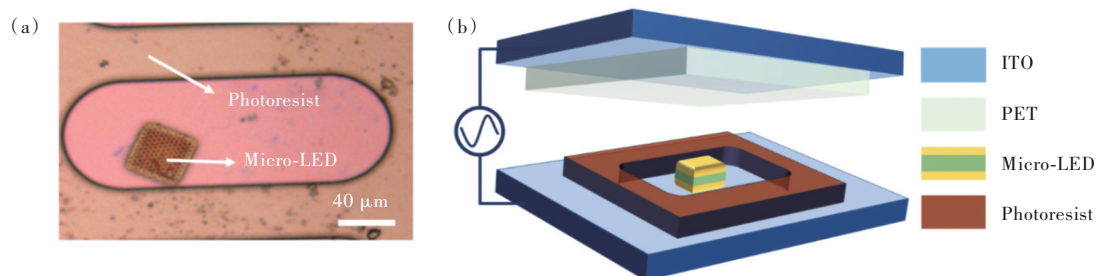


图 1 (a)自支撑 Micro-LED 芯片;(b)单注入型 Micro-LED 结构示意图。

Fig.1 (a)Microscope image of the self-supported Micro-LED chip. (b)Schematic diagram of a single-injection type Micro-LED.

3.2 光电性能分析

图 2 描述了在正弦交流电 ($300\ \text{kHz}$, $70V_{pp}$) 驱动下单注入型 Micro-LED 器件的发光波形图,可以看出其发光波形稍微滞后于电流波形。这是由于绝缘层的存在,在施加信号的瞬间,回路中的电流达到最大,进一步逐渐形成电场,通过电场力作用驱动载流子运动至多量子阱 (MQWs) 中复合发

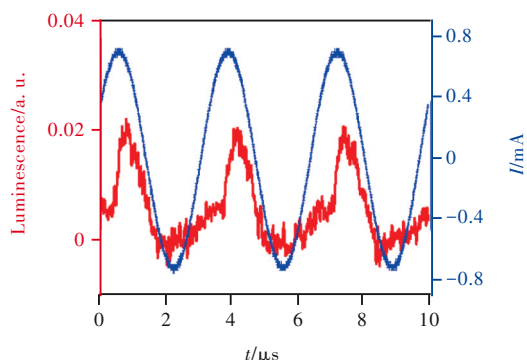


图 2 正弦交流电驱动下的发光波形与电流

Fig.2 Luminous and current waveform of the device driven by sinusoidal alternating voltage

光。而这个从电场形成到载流子复合发光的时间就是图中所显示的滞后。由图中曲线还可以得出单注入型 Micro-LED 器件只在正半周期驱动时发光,其机理我们将在后面进行讨论。

在传统直流驱动 LED 中,器件的亮度主要取决于驱动电压、注入电流的大小^[23-25]。而单注入型 Micro-LED 器件亮度不仅与驱动电压大小有关,且对驱动信号频率十分敏感^[26-28]。图 3(a)描述了在不同驱动电压下信号频率与回路中电流的关系。以 $70V_{pp}$ 为例,随着频率增加到 $10\ \text{kHz}$,电流基本保持不变;频率进一步增加到 $40\ \text{kHz}$,电流呈指数式增长;当频率大于 $1\ \text{MHz}$ 后,电流基本趋于稳定。类似地,在不同电压下, $1\ \text{MHz}$ 频率后电流都趋于稳定;不同的是,电压越高,最后稳定的电流值也不同,具体表现为电压越高、稳定的电流值越高。

传统直流驱动的 LED 作为电流驱动型器件,在工作区以内通常表现为电流越大、LED 发光亮度越高^[29-30]。交流驱动的单注入型 Micro-LED 对

驱动频率更为敏感。以 $70V_{pp}$ 为例,其开启频率为 40 kHz,随着交流电驱动频率的增大,器件内部电流变大,发亮亮度变大。不同于传统直流驱动 LED 器件的是,交流驱动的单注入型 Micro-LED 存在最佳的驱动频率。当频率到达 300 kHz 附近时,亮度达到最大 ($3.5 \mu\text{W}/\text{cm}^2$);当交流驱动频率大于最佳驱动频率时,发光亮度将随着频率的升高而降低,如图 3(b)所示。因此交流驱动的 Micro-LED 的发光亮度不仅取决于注入电流,还受驱动频率的影响^[31-32]。

为了研究单注入型 Micro-LED 器件结构对性能的影响,借鉴传统 LED 模型,单注入型 Micro-LED 可以用 RC 电路等效,从电路的角度定性地对单注入型 Micro-LED 的电学性能进行分析。由于绝缘层的存在,外部电极与芯片之间形成等效电容,同时 Micro-LED 可以等效为电容与电阻的并联。因此,单端载流子注入 Micro-LED 器件电路模型可以等效为如图 3(c)中的 RC 电路,该电路的阻抗为:

$$Z = R_{\text{external}} + \frac{1}{j\omega C_{\text{external}}} + \frac{\frac{1}{j\omega C_{\text{LED}}} \times R_{\text{LED}}}{\frac{1}{j\omega C_{\text{LED}}} + R_{\text{LED}}}, \quad (1)$$

其中 $\omega = 2\pi f$, f 为交流信号频率, R_{external} 为外部串联电阻, C_{external} 为绝缘层等效电容, C_{LED} 为 Micro-LED 等效电容, R_{LED} 为 Micro-LED 等效电阻。 R_{external} 、 C_{external} 、 C_{LED} 和 R_{LED} 分别为 $20\,000 \Omega$ 、 5 pF 、 $5 \times 10^3 \text{ pF}$ 和 240Ω 。单注入型 Micro-LED 的 C_{LED} 与 R_{LED} 与已报道的 Micro-LED 芯片的 C_{LED} 与 R_{LED} 相近^[33]。由公式(1)可知,电路的总阻抗由电阻和电容确定,且随频率的增大而减小;而当频率大于某个特定值时,阻抗基本保持不变。这就解释了回路中的电流为什么呈现出先增大后趋于稳定的趋势。针对该 RC 电路模型,对电流-频率特性进行计算,如图 3(c)所示,理论结果(实线)和实验结果(虚线)基本吻合,进一步证明了本研究中的单注入型 Micro-LED 可以用该 RC 电路模型等效,为后续优化单注入型 Micro-LED 器件结构和驱动信号参数具有指导意义。

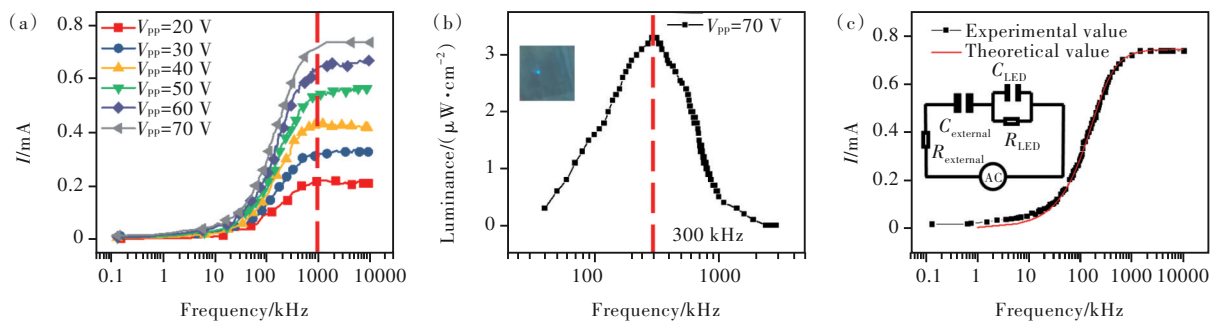


图 3 (a)不同驱动电压下的电流-频率特性;(b)驱动电压为 $70V_{pp}$ 时的亮度-频率特性;(c)频率-电流特性的理论与实验结果。

Fig.3 (a)Current-frequency characteristics under different driving voltages. (b)Brightness-frequency characteristics under $70V_{pp}$. (c)Theoretical and experimental current-frequency characteristics.

通过对上述单注入型 Micro-LED 的 RC 等效电路分析可知,交流驱动的单注入型 Micro-LED 的阻抗易受频率的影响变化。除此之外,驱动电压也影响单注入型 Micro-LED 的电流和发光亮度。图 4(a)为不同频率下电流-电压特性曲线,在 30 kHz~1.5 MHz 频率下,电流-电压特性曲线基本呈现为线性关系。由公式(1)可知,单注入型 Micro-LED 器件的总阻抗在固定频率下总是保持不变的,因此当频率固定时,其电流-电压特性曲线基本呈线性关系,这与传统直流驱动 LED 指数型电流-电压特性曲线明显不同。图 4(b)展示的是器件在不同驱动电压的显微图像,当频率不变

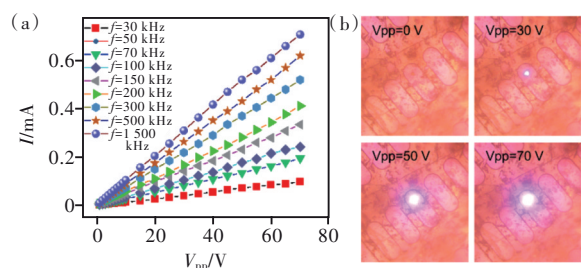


图 4 (a)器件在不同频率下的电流-电压特性曲线;(b)器件在不同 V_{pp} 下的发光图像。

Fig.4 (a) Current-voltage curves of the device at different frequencies. (b) Microscopic images of devices at different V_{pp} .

时,随着电压的增大,器件亮度逐渐增大,说明在高电压的驱动下,有更多的载流子流入 Micro-LED 进行辐射复合。

3.3 模拟仿真

为了更深层次地探究单注入型 Micro-LED 的工作机理,我们建立了单注入模型的 Micro-LED 有限元仿真模型,定量展示在交流电场下的单注入型 Micro-LED 能带变化,为单注入型 Micro-LED 的工作机理提供了清晰的物理图像^[34]。图 5(a)为正弦交流电驱动的单注入型 Micro-LED 仿真模型图,仿真模型结构依次为绝缘层(100 nm)、p-GaN(长度为 200 nm、掺杂浓度为 $7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)、AlGaIn 电子阻挡层(20 nm)、InGaIn/GaN 多量子阱、n-GaN(长度为 2 000 nm,掺杂浓度为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)。图 5(b)为施加的正弦交流电压波形,其中 T_1 时刻电压为零, Micro-LED 处于初始状态。 T_2 为正半周期的电压达到最大值的时刻,此时器件处于正向偏置状态。 T_3 为正半周期结束时刻, T_4 为负半周期电压达到最大值的时刻,器件处于反向偏置状态。如图 5(c)所示为单注入型 Micro-LED 能带图的模拟仿真结果,在 $T_1 \sim T_2$ 阶段,当正弦电压开始施加在单注入型 Micro-LED 器件上时,此时器件

处于正向偏置状态,n区的电子受外部电场的作用迁移到 MQWs 中,与从 p 区运动到 MQWs 中的空穴形成辐射复合。从仿真结果可以看出,在正弦交流电的正半周期,n区的能带未发生弯曲,而靠近绝缘层的 p 区能带发生明显的弯曲。当施加的电压在 $T_1 \sim T_2$ 时刻变化时,外部载流子无法注入到 p 端中,此时在器件内部参与复合的空穴来源于 p-GaN。靠近绝缘层的 p-GaN 的空穴被不断消耗,导致了空穴填充水平降低,甚至形成了电子积累(即形成了反型层),造成了 p 层能带的强烈扭曲。我们注意到施加到 Micro-LED 的电压是“电源电压”和“感应电压”的总和。在正半周期,感应电压来自于 p-GaN 处的电子积累,其形成的电场与外加电源电场反向。在 $T_2 \sim T_3$ 时刻,尽管外加的电源电压仍处于正向偏置状态,但此时外加的电源电压的数值在下降。因此,在 $T_2 \sim T_3$ 时刻感应电压大于外加电源电压,导致 Micro-LED 工作在反偏状态。在 $T_3 \sim T_4$ 阶段,随着负半周期电压的增加,空穴被拉到 p 区与绝缘层界面处,在能带上表现为 p 区的能带能量升高,能带被拉平。与正半周期类似,负半周期的 n 区能带未发生弯曲。

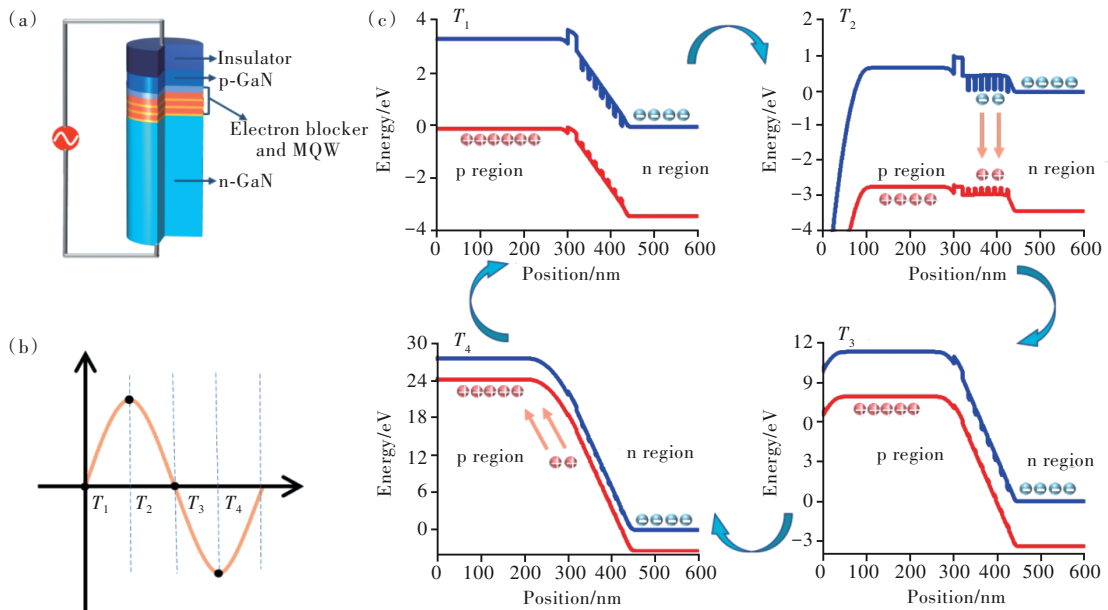


图 5 (a)单注入型 Micro-LED 仿真模型;(b)正弦交流电压波形图;(c)各时刻的单注入型 Micro-LED 能带图。

Fig.5 (a) Simulation model of single-injection type Micro-LED. (b) Waveform diagram of a sinusoidal AC voltage. (c) Energy band diagrams of the single-injection type Micro-LED.

3.4 工作原理分析

在正弦交流驱动下,器件内载流子的运动变化如图 6 所示。其中图 6(a)、(b)表示在正弦交流

电压的正半周期驱动下的器件内部载流子运动状态。如图 6(a)所示,在正半周期下,电子从交流电源负极经 n-GaN 进入到 MQWs。由于绝缘层的

存在,从电源正极流出的正电荷无法进入到 p-GaN 中,而是累积在绝缘层的表面。此时 p-GaN 中的多数载流子(空穴)运动到 MQWs 中,与由外部注入到 MQWs 中的电子发生辐射复合。p-GaN 中的空穴向 MQWs 运输的最终表现效果为靠近绝缘层的 p-GaN 形成带负电的耗尽层,并且随着电子的积累,还会形成反型层(图 6(b))。从电路的角度分析,“金属电极/绝缘层/p-GaN”所形成的等效电容在正半周电压上升阶段处于充电的状态。器件绝缘层的外部将会有正电荷累积,其积累的电荷量是由器件的等效电容所决定。同时,p-GaN 中的等量空穴迁移到 MQWs,并与从 n-GaN 注入的电子发生辐射复合。

当正向电压达到最大值时,充电过程完成即等效电容充满电,将不再有多余的电子从 n-GaN 注入。当交流电源处于正半周电压下降阶段和负半周期时,载流子运动状态如图 6(c)所示,n-GaN 中的电子将向电源正极移动。类似地,绝缘层外部的正电荷向电源负极移动,p-GaN/绝缘层界面的负电荷数量减少。最终结果是,绝缘层外的正电荷被完全消耗,靠近绝缘层的 p-GaN 从反型状态变为耗尽状态,并且随着耗尽程度的下降最终回到本带状态(图 6(d))。由该过程可知,在一个驱动周期中,只有正半周驱动时 Micro-LED 发光,而负半周期只是为下一个正半周期的发光做准备。

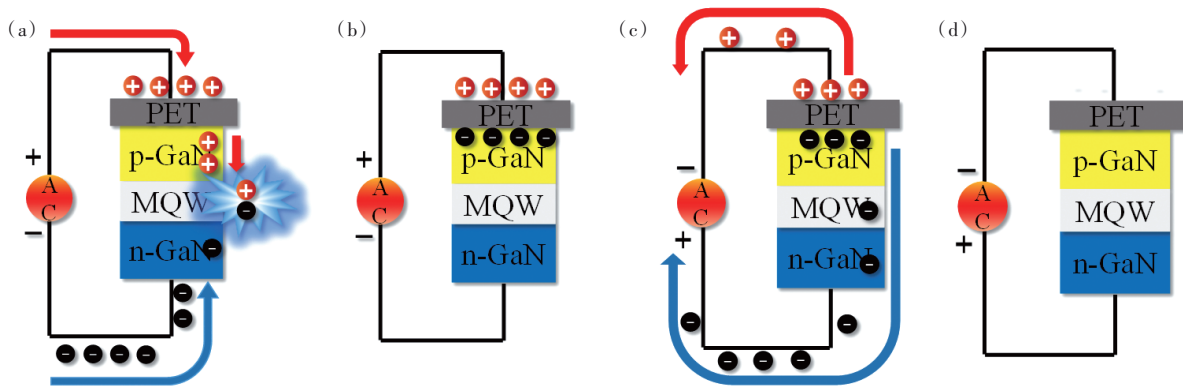


图 6 (a)正电压下器件发光时的载流子运输状态;(b)正电压下内部载流子处于稳定状态;(c)负电压下器件载流子运动状态;(d)一个正弦电压周期结束后的器件状态。

Fig.6 (a)Schematic diagram showing the carrier transport when the device emits light under positive voltage. (b)Schematic diagram showing the stable state under positive voltage. (c)Schematic diagram showing the carrier transport when the device under negative voltage. (d)Device state after one sinusoidal voltage cycle.

单注入型 Micro-LED 发光机理是电子、空穴输运到 MQWs 并产生复合发光,因此当交流驱动信号的频率改变时,电子、空穴的输运行为及随后的复合发光行为也会发生相应变化。单注入型 Micro-LED 可以等效为“电容器-LED”串联结构。众所周知,随着驱动频率的提高,该结构的等效电抗下降,即流过 Micro-LED 的电流增大。因此,在低频范围内发光亮度随着频率的提高而增强。另一方面,当频率逐渐增大时,单位时间内的光脉冲数量增多,因此器件发光亮度增大。然而,当频率过高时,器件亮度下降,如图 3(b)所示。高频范围内,造成亮度随频率下降的可能原因有两个。首先,器件的发光源自于载流子扩散到 MQWs 区域并产生辐射复合,当正半周期时间较短时,载流子来不及扩散至 MQWs 区域就被随后的反向电场(即负半周期)拉开。因此,频率的提高导致注入到 MQWs 中的载流子数量减少,从而造成器件亮

度下降。此外,随着驱动频率的增加负半周期的驱动时间减短,反向流过 Micro-LED 的载流子数量减少。这就意味着用于下一个正半周期发光的载流子数目减少。因此随着频率的提高,单注入型 Micro-LED 亮度呈降低趋势。

3.5 基于单端注入的 Micro-LED 检测

本文研究的单注入型 Micro-LED 有望应用于微显示检测。基于单注入型 Micro-LED 的检测系统示意图如图 7(a)所示,整个系统由两个部分组成。其中第一个部分由交流电源、样品座、金属探针组成,将交流电源的两端分别连接金属探针与样品座,通过控制金属探针与垂直结构 Micro-LED 的 p 端连接,实现单端载流子的注入与 Micro-LED 辐射复合发光。第二部分用于检测 Micro-LED 的发光状态,由安置在样品座底部的倒置显微镜组成。图 7(b)为显微镜拍摄的垂直结构 Micro-LED 阵列,每个 Micro-LED 的尺寸为 $7 \mu\text{m} \times$

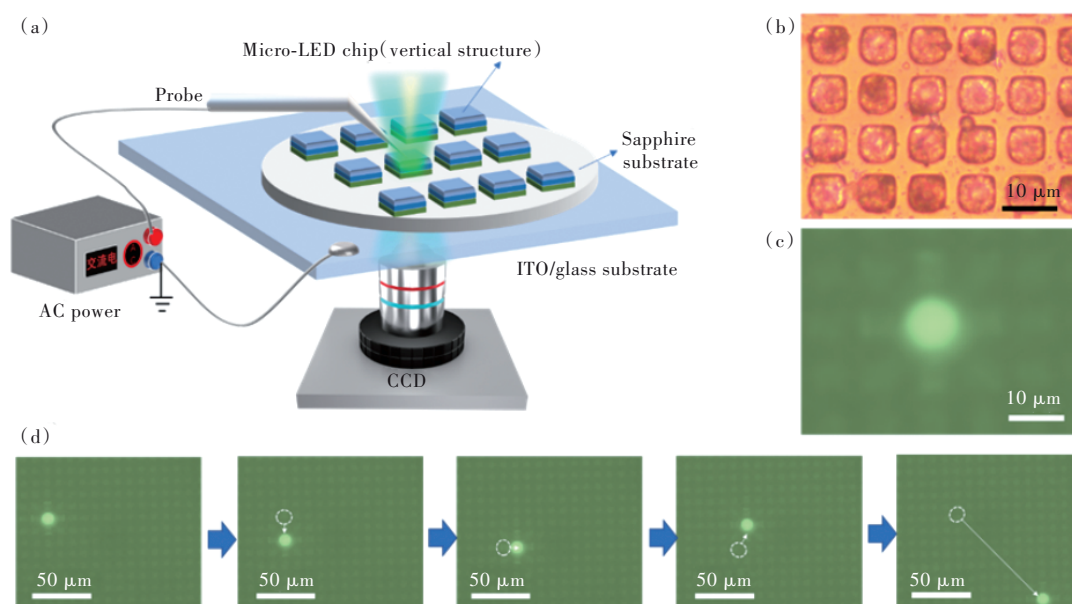


图 7 (a) 基于单注入方法的 Micro-LED 检测系统示意图; (b) 垂直结构 Micro-LED 显微照片; (c) 工作于单注入模式的垂直结构 Micro-LED 发光图; (d) 对不同 Micro-LED 芯片的检测效果图。

Fig.7 (a) Schematic diagram of the Micro-LED detection system based on single-injection method. (b) Micrograph of vertical structure Micro-LEDs. (c) Luminescence image of Micro-LED detected by using the detection system. (d) Luminescence images of different Micro-LEDs.

7 μm , 该尺寸 Micro-LED 芯片与前文研究用到的 40 μm × 40 μm Micro-LED 芯片结构一致。我们用 40 μm × 40 μm Micro-LED 芯片主要是为了探究单注入模式的发光机理。这是因为尺寸较大的芯片有利于单注入型 Micro-LED 的制备。而对于将单端注入的原理运用到 Micro-LED 芯片的电致发光检测时, 我们选用的是 7 μm × 7 μm 的垂直结构 Micro-LED 芯片, 这是为了验证该技术对于极小 Micro-LED 检测的实用性。在高密度的 Micro-LED 阵列中, 利用显微镜放大 Micro-LED 阵列图像, 通过电脑能够识别 Micro-LED 的发光状态, 从而实现 Micro-LED 的坏点检测, 如图 7(c) 所示。同时通过移动探针能够实现制备在蓝宝石衬底上垂直结构 Micro-LED 芯片的单端电致发光检测 (图 7(d)), 探针与 Micro-LED 建立有效的单端电气连接, 检测生长于同一蓝宝石衬底上的不同 Micro-LED 芯片, 实现了连续单点检测, 证明了基于单端注入模式的 Micro-LED 检测的可行性。

采用传统的电致发光检测方式对 Micro-LED 芯片进行测试, 可以准确地提供 Micro-LED 芯片的电学性能, 给出芯片的发光波长和亮度等信息, 但是难以检测制备于蓝宝石衬底上的垂直结构 Micro-LED 芯片^[35-39]。此外, 对于 Micro-LED 芯片的巨量检测而言, Micro-LED 芯片数量多且尺寸

小, 两端电极难以与外部电极高效地建立高质量的电气连接, 实现高效率且稳定的双端载流子注入难度大。因此, 传统的电致发光检测方式在检测效率上难以满足 Micro-LED 巨量检测要求, 目前尚没有成熟的适用于 Micro-LED 芯片的电致发光检测工艺^[40-41]。基于单端注入的 Micro-LED 检测相较于传统的电致发光检测方式, 其优势不仅在于单注入型 Micro-LED 的单端电气接触能够实现 Micro-LED 辐射复合发光, 而且避免了传统的电致发光检测方法难以检测制备于蓝宝石衬底上的垂直结构 Micro-LED, 降低了检测难度, 为微显示检测提供了一种新的思路, 有望成为新型的 Micro-LED 检测方法。

单注入型 Micro-LED 的发光性能难以与常规 Micro-LED 进行比较。首先是亮度或光功率, 单注入型 Micro-LED 的驱动电压较大 (本文中可以达到 70V_{pp}), 而传统 Micro-LED 的驱动电压显然远远小于该数值, 因此亮度不存在可比性。其次是外量子效率, 传统 Micro-LED 的外部注入电流很容易测试, 因此外量子效率容易获得。而对于单注入型 Micro-LED, 对发光有贡献的除了注入的载流子还有器件内部的载流子, 因此难以计算外量子效率。

单注入模式主要是为了解决 LED 芯片进一

步缩小后所面临的电接触难题。尽管单注入型 Micro-LED 工作电压高、频率高,但是通过对材料和器件结构进行优化,是有机会降低单注入型 Micro-LED 工作电压的。此外,单注入模式在 Micro-LED 电致发光检测方面具有显著优势,为 Micro-LED 检测提供了新的思路与方法。

4 结 论

本文提出了一种单注入型 Micro-LED 器件,其中 Micro-LED 芯片与外部驱动引线之间仅存在单端的电学接触, Micro-LED 芯片的另一端采用绝缘层与外部电极隔离开。在交流电场的驱动下,电子/空穴周期性地注入 Micro-LED 芯片,从而实现稳定的周期性发光。获得了单注入型 Micro-LED 器件的电流-驱动电压关系、电流-驱动频率关系、亮度-驱动频率关系,建立单注入模式下 Micro-LED 的仿真模型,量化了在交流驱动下单注

入型 Micro-LED 的能带变化细节,阐述了单注入型 Micro-LED 的工作机理。研究表明,单注入型 Micro-LED 的发光亮度除了受驱动电压、注入电流的影响外,还对驱动频率极为敏感,在固定某一电压下,存在一个最佳驱动频率。单注入型 Micro-LED 的亮度随着驱动频率的增加而增大,当超过最佳驱动频率后,亮度将随驱动频率的增加而减小。驱动电压为 $70V_{pp}$ 时,开启频率为 40 kHz,最佳驱动频率为 300 kHz,最大亮度为 $3.5 \mu W/cm^2$ 。初步验证了单端载流子注入模式应用于 Micro-LED 检测的可行性,克服了传统检测方法难以检测生长于蓝宝石衬底的垂直结构 Micro-LED 的缺点,为 Micro-LED 检测提供了新思路。

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.20220270>.

参 考 文 献:

- [1] 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.
- [2] TEMPLIER F. GaN-based emissive microdisplays: a very promising technology for compact, ultra-high brightness display systems [J]. *J. Soc. Inf. Disp.*, 2016, 24(11): 669-675.
- [3] 史晓刚, 薛正辉, 李会会, 等. 增强现实显示技术综述 [J]. *中国光学*, 2021, 14(5): 1146-1161.
SHI X G, XUE Z H, LI H H, *et al.* Review of augmented reality display technology [J]. *Chin. Opt.*, 2021, 14(5): 1146-1161. (in Chinese)
- [4] 郭俊达, 金伟其, 顿雄, 等. 基于 OLED 微显示器和变形目镜的全景显示技术 [J]. *中国光学*, 2018, 11(4): 684-693.
GUO J D, JIN W Q, DUN X, *et al.* Panoramic display technology based on OLED micro-display and anamorphic eyepiece [J]. *Chin. Opt.*, 2018, 11(4): 684-693. (in Chinese)
- [5] 季渊, 王成其, 陈文栋, 等. OLED 微显示器的原子扫描策略 [J]. *光学精密工程*, 2018, 26(4): 998-1005.
JI Y, WANG C Q, CHEN W D, *et al.* An atom scan strategy for OLED micro display [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(4): 998-1005. (in Chinese)
- [6] HUANG Y G, HSIANG E L, DENG M Y, *et al.* Mini-LED, Micro-LED and OLED displays: present status and future perspectives [J]. *Light: Sci. Appl.*, 2020, 9(1): 105-1-16.
- [7] WU T Z, SHER C W, LIN Y, *et al.* Mini-LED and Micro-LED: promising candidates for the next generation display technology [J]. *Appl. Sci.*, 2018, 8(9): 1557-1-17.
- [8] CHEN H W, LEE J H, LIN B Y, *et al.* Liquid crystal display and organic light-emitting diode display: present status and future perspectives [J]. *Light: Sci. Appl.*, 2018, 7(3): 17168-1-13.
- [9] DAY J, LI J, LIE D Y C, *et al.* III-nitride full-scale high-resolution microdisplays [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, 99(3): 031116-1-3.
- [10] NAKAMURA S, KRAMES M R. History of gallium-nitride-based light-emitting diodes for illumination [J]. *Proc. IEEE*, 2013, 101(10): 2211-2220.
- [11] ZHU G Q, LIU Y J, MING R, *et al.* Mass transfer, detection and repair technologies in micro-LED displays [J]. *Sci. China Mater.*, 2022, 65(8): 2128-2153.

- [12] 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): 198501-1-24.
PAN Z J, CHEN Z Z, JIAO F, *et al.* A review of key technologies for epitaxy and chip process of micro light-emitting diodes in display application [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2020, 69(19): 198501-1-24. (in Chinese)
- [13] SHIH F, TSOU C, FANG W. A monolithic micromachined thermocouple probe with electroplating nickel for Micro-LED inspection [J]. *J. Microelectromech. Syst.*, 2021, 30(6): 864-875.
- [14] UM J G, JEONG D Y, JUNG Y, *et al.* Active-matrix GaN μ -LED display using oxide thin-film transistor backplane and flip chip LED bonding [J]. *Adv. Electron. Mater.*, 2019, 5(3): 1800617-1-8.
- [15] SO H, SENESKY D G. Rapid fabrication and packaging of AlGaIn/GaN high-temperature ultraviolet photodetectors using direct wire bonding [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2016, 49(28): 285109-1-8.
- [16] SO H, SENESKY D G. ZnO nanorod arrays and direct wire bonding on GaN surfaces for rapid fabrication of antireflective, high-temperature ultraviolet sensors [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2016, 387: 280-284.
- [17] PARK J, SIN Y G, KIM J H, *et al.* Dependence of adhesion strength between GaN LEDs and sapphire substrate on power density of UV laser irradiation [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2016, 384: 353-359.
- [18] MISHKAT-UL-MASABIH S, LEONARD J, COHEN D, *et al.* Techniques to reduce thermal resistance in flip-chip GaN-based VCSELs [J]. *Phys. Status Solidi A*, 2017, 214(8): 1600819-1-5.
- [19] SUN J, FATIMA H, KOUDYMOV A, *et al.* Thermal management of AlGaIn-GaN HFETs on sapphire using flip-chip bonding with epoxy underfill [J]. *IEEE Electron Device Lett.*, 2003, 24(6): 375-377.
- [20] 周自平, 黎焱, 严银菜, 等. Micro-LED 应用于近眼显示的现状与趋势 [J]. 液晶与显示, 2022, 37(6): 661-679.
ZHOU Z P, LI Y, YAN Y G, *et al.* Current situation and trend of Micro-LED application in near-eye display [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2022, 37(6): 661-679. (in Chinese)
- [21] XU L L, XU J, ZHANG W, *et al.* High-stability reflective bonding pads for GaN-based flip-chip light-emitting diodes packaged by reflow soldering [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2019, 52(26): 265102-1-7.
- [22] YANG L Q, YUAN F, ZHANG J H. Effects of ultrasonic bonding parameters on reliability of flip chip GaN-based light emitting diode [J]. *J. Shanghai Univ. (Engl. Ed.)*, 2011, 15(4): 262-266.
- [23] CHO J, PARK J H, KIM J K, *et al.* White light-emitting diodes: history, progress, and future [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2017, 11(2): 1600147-1-17.
- [24] NAKAMURA S. Nobel lecture: background story of the invention of efficient blue InGaIn light emitting diodes [J]. *Rev. Mod. Phys.*, 2015, 87(4): 1139-1151.
- [25] FEEZELL D F, SPECK J S, DENBAARS S P, *et al.* Semipolar ($20\bar{2}\bar{1}$)InGaIn/GaN light-emitting diodes for high-efficiency solid-state lighting [J]. *J. Disp. Technol.*, 2013, 9(4): 190-198.
- [26] 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.
- [27] 申奕伟, 李文豪, 郭家玮, 等. 交流型量子点发光器件: 现状、挑战与展望 [J]. 真空科学与技术学报, 2022, 42(5): 317-329.
SHEN Y W, LI W H, GUO J W, *et al.* AC-driven quantum dot light emitting devices: status, challenges and prospects [J]. *Chin. J. Vac. Sci. Technol.*, 2022, 42(5): 317-329. (in Chinese)
- [28] WU C X, WANG K, GUO T L. Theoretical study of LED operating in noncarrier injection mode [J]. *Nanomaterials*, 2022, 12(15): 2532-1-10.
- [29] PAN C C, TANAKA S, WU F, *et al.* High-power, low-efficiency-droop semipolar ($20\bar{2}\bar{1}$) single-quantum-well blue light-emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Express*, 2012, 5(6): 062103-1-3.
- [30] AHN B J, KIM T S, DONG Y Q, *et al.* Experimental determination of current spill-over and its effect on the efficiency droop in InGaIn/GaN blue-light-emitting-diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 100(3): 031905-1-4.
- [31] WANG K, LIU Y, WU C X, *et al.* Electroluminescence from μ LED without external charge injection [J]. *Sci. Rep.*, 2020, 10: 8059-1-8.
- [32] 吴春晖, 朱石超, 付丙磊, 等. 载流子分布对 GaN 基 LED 频率特性的影响 [J]. 发光学报, 2017, 38(3): 347-352.
WU C H, ZHU S C, FU B L, *et al.* Influence of carrier distribution on the frequency behavior for GaN-based LEDs [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2017, 38(3): 347-352. (in Chinese)

- [33] 杨焯波. GaN 基微尺寸阵列 LED 芯片的制备 [D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
YANG D B. *Fabrication of GaN-based Micro-LED Arrays* [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [34] 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*, 2022, 12(6): 912-1-14.
- [35] KOKUBO N, TSUNOOKA Y, FUJIE F, *et al.* Nondestructive visualization of threading dislocations in GaN by micro Raman mapping [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2019, 58(SC): SCCB06-1-5.
- [36] ZHENG L L, GUO Z Q, YAN W, *et al.* Research on a camera-based microscopic imaging system to inspect the surface luminance of the micro-LED array [J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 51329-51336.
- [37] ZHANG K, PENG D, LAU K M, *et al.* Fully-integrated active matrix programmable UV and blue micro-LED display system-on-panel (SoP) [J]. *J. Soc. Inf. Disp.*, 2017, 25(4): 240-248.
- [38] YAMAMOTO H, AGUI K, UCHIDA Y, *et al.* Evaluation of carrier concentration reduction in GaN-on-GaN wafers by Raman spectroscopy and Kelvin force microscopy [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2017, 56(8S1): 08LB07-1-5.
- [39] BAGNALL K R, MOORE E A, BADESCU S C, *et al.* Simultaneous measurement of temperature, stress, and electric field in GaN HEMTs with micro-Raman spectroscopy [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2017, 88(11): 113111-1-3.
- [40] CHO N H, JUNG U, KIM S, *et al.* Non-destructive inspection methods for LEDs using real-time displaying optical coherence tomography [J]. *Sensors*, 2012, 12(8): 10395-10406.
- [41] SHI S C, BAI W H, LIN C J, *et al.* Uniformity and stability of quantum dot pixels evaluated by microscale fluorescence spectroscopy [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2022, 16(8): 2100699-1-8.



李俊龙(1999-),男,福建南平人,硕士研究生,2021年于福州大学获得学士学位,主要从事 Micro-LED 及量子点显示器件的应用基础研究。

E-mail: 211120029@fzu.edu.cn



吴朝兴(1985-),男,福建晋江人,博士,教授,博士生导师,2015年于福州大学获得博士学位,主要从事纳米材料光电性能及其在纳米发光显示、神经元显示、类神经电子的应用基础研究。

E-mail: chaoxing_wu@fzu.edu.cn



王堃(1995-),男,福建福安人,博士研究生,2021年于福州大学获得硕士学位,主要从事纳米发光显示及新型光电子器件的应用基础研究。

E-mail: 211110018@fzu.edu.cn