

激光与光电子学进展

新型发光三极管器件设计与光电调控性能仿真研究

陈晶晶¹, 郝绍坤¹, 周雄图^{1,2*}, 吴朝兴^{1,2}, 张永爱^{1,2}, 郭太良^{1,2}, 孙捷^{1,2}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 350116

摘要 微米级间距发光二极管(Micro-LED)在材料、器件、工艺和应用场景方面具有诸多独特优势,随着未来显示器件向发光、开关、传感等多功能集成的方向发展, Micro-LED往往需要小电流密度驱动,驱动模式面临着巨大的挑战。为了实现小电流输入对LED发光器件的调控,基于相同的GaN材料和工艺平台,提出一种集发光和调控为一体的新型多功能集成发光三极管(LET)器件。该器件为双极型晶体管和发光二极管的垂直集成结构,通过改变基区电压控制电子运动到发光有源区的数量进而调控器件的发光效果;通过双极型晶体管(BJT)的电流增益效果实现了相同光效的输入电流从毫安级别降到了微安级别,并在一定电压范围内实现了高度线性调控。该LET器件可通过小功率信号进行控制和驱动,有望成为高密度、高集成度智能显示的一种变革性技术。

关键词 集成光学; 发光三极管; 集成器件; 电流增益; 调控性能

中图分类号 TN383; TN256

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1713001

Design of New Type Light-Emitting Triode Device and Simulation Research on Photoelectric Regulation Performance

Chen Jingjing¹, Hao Shaokun¹, Zhou Xiongту^{1,2*}, Wu Chaoxing^{1,2}, Zhang Yongai^{1,2},
Guo Tailiang^{1,2}, Sun Jie^{1,2}¹College of Physical and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, Fujian, China;²Fujian Science and Technology Innovation Laboratory for Optoelectronic Information of China, Fuzhou 350116, Fujian, China

Abstract Micro-light-emitting diodes (Micro-LEDs) offer many unique advantages in materials, devices, technologies, and process applications. In the future, display devices will evolve in the direction of multi-functional integration, such as lighting, swiching, and sensing, Micro-LEDs often require low-current-density driving, and the driving mode faces considerable challenges. To modulate LED devices with a low current input, herein, we propose a new type multifunctional integrated light-emitting triode device that integrates light emission and regulation functions, based on the same GaN material used in LEDs and process platform. The device shows a vertically integrated structure comprising bipolar transistors and LEDs. The number of electrons moving to the light-emitting active layer can be controlled by changing the base voltage, and the luminous effect of the device is simultaneously adjusted. Based on the current gain effect of bipolar junction transistor (BJT), the input current under the same light effect can be reduced from the milliampere to the microampere level and a highly linear regulation is achieved within a certain voltage range. The device can be controlled and driven using low-power signals and is expected to become a revolutionary technology for high-density and high-integration smart displays.

Key words integrated optics; light-emitting transistor; integrated device; current gain; regulation performance

1 引言

随着5G/6G通信、物联网、人工智能、可穿戴设备等新一代信息技术的快速发展,对作为信息窗口的未来显示器件提出了多功能、集成化、个性化等要求。基

于GaN材料的微米级间距发光二极管(Micro-LED)在材料、器件、工艺和应用场景方面具有高效率、高亮度、低功耗、长寿命、高响应速度、容易微型化和集成化等诸多独特优势^[1-7],成为新型显示技术的研究前沿与热点。然而,目前Micro-LED还没有大规模产业化,

收稿日期: 2021-12-01; 修回日期: 2021-12-30; 录用日期: 2022-01-11

通信作者: *xtzhou@fzu.edu.cn

尤其是多功能集成的智能 LED 半导体器件的研究尚未取得突破,究其原因是在技术上还存在诸多挑战。其中,发光器件与开关和控制元器件的集成是该领域一个核心技术难题。Micro-LED 显示一般需要复杂的驱动电路,提供诸如发光强度调节等功能。而显示驱动芯片输出的小功率信号往往不能直接驱动 LED 发光器件,需要在驱动芯片和发光器件之间连接功率放大元件以实现驱动信号的功率放大^[8-9]。另一方面,驱动电路一般由互补金属氧化物半导体(CMOS)电路、薄膜场效应晶体管(TFT)电路或硅基电子元器件制成,由于材料和工艺体系不同,需要复杂的转移和键合过程来实现 Micro-LED 芯片与驱动电路的集成^[10]。此外,焊接键合一般需要高温高压过程,不可避免会对器件造成影响,再加上焊接键合容易产生寄生电容和电阻,从而影响器件的整体性能^[11-12]。

GaN 半导体具备宽带隙、高饱和电子漂移速度、高临界击穿电场及通过异质结会形成高电子密度的二维电子气等材料特性^[13-15],可实现更快速的开关、更紧凑的尺寸、更高的功率密度及更高的电源转换能效,适用于开关电源和其他能效及功率密度至关重要的应用中,在电力电子器件应用领域,特别是高温、高频器件领域具有独特的优势。除了 LED 器件,GaN 还被广泛应用于双极型晶体管(BJT)、高电子迁移率晶体管(HEMT)、场效应管(FET)等开关器件^[16-17]中。基于 GaN 材料性能的突出优势,且基于 GaN 电子器件驱动电路与 GaN 基 Micro-LED 具有的共同材料和工艺体系,Micro-LED 与 GaN 电子器件驱动电路的集成有望实现集开关、驱动、发光、感知、探测、信号传输等多功能为一体的高度集成半导体器件,引领未来智能显示、智能照明和光通信等技术的发展方向。近些年,众多研究者致力于研究半导体集成器件,将驱动晶体管和 LED 集成在同一基板,实现 LED 的驱动集成,并取得了一定的成果^[14,18-24]。2010 年孙润光等^[18]提出了一种 GaN 基 FET 驱动 Micro-LED 发光像素的单片集成器件结构,将 FET 与 LED 制备统一于 GaN 外延层之上,以实现 FET 对 LED 的驱动。2013 年 Li 等^[19]提出了一种基于 GaN 的 LED 和 HEMT 结构的单片集成器件采

用选择性外延的方法制备器件实现了 LED 和 HEMT 的互连,也提出了发光集成电路(LEIC)的概念。2014 年 Lee 等^[14]研究了一种基于 GaN 基的 LED 和金属氧化物半导体场效应管(MOSFET)的单片集成器件,提出将 MOSFET 直接制备在 LED 的 n-GaN 层上与 LED 直接进行串联,简化了之前单片集成器件的复杂外延工艺。2020 年 Yan 等^[20]研究了基于硅衬底上 GaN LED 外延晶片上的增强型 MOSFET 的单片集成器件。这些研究通过将驱动晶体管如 FET、HEMT 和 LED 横向集成于同一外延层之上,实现了一定的集成驱动。但是这些横向集成器件芯片在一定程度上牺牲了芯片的部分发光面积。2021 年 Hartensveld 等^[21]提出了垂直 FET 和 LED 的集成器件,最大程度保证了器件的发光面积。然而,Micro-LED 与 GaN 驱动电路的单片集成研究方兴未艾,由于 HEMT 和 MOSFET 本身器件结构和工艺的复杂性,严重影响了集成器件的性能,GaN 基 LED 与 HEMT 和 MOSFET 单片集成发光系统仍然存在工艺复杂、发光单元开口率低、光输出功率和光电转化效率低等问题。因此,进一步设计集成器件结构,改进器件制备工艺,研制发光、开关、驱动等多功能集成的新型发光器件具有重要的科学意义和应用前景。

本文基于与 LED 相同的 GaN 材料和工艺制程体系,提出一种 GaN 基 BJT 和 LED 同质单片集成,获得集发光、开关和控制等功能于一体的发光三极管(LET)新思路,采用 BJT 器件的开关特性和电流放大特性,实现小电流控制器件高发光,降低器件的驱动功率,实现了利用小功率信号就能对 LED 发光进行控制。为了进一步检测 LET 器件是否驱动调控功能,采用仿真方法研究 LET 结构器件的性能,系统分析了 LET 的电流放大系数(β)、电流电压特性(I-V)、光输出功率(LOP)和内量子效应(IQE)等性能。

2 器件结构与仿真方法

LET 等效电路、器件结构和工作原理如图 1(a)、1(b)所示。为了使器件结构和工艺更简单,采用“LED on BJT”的垂直集成方式,BJT 集电区与 LED 的 n 型半导体区共用,避免 GaN 晶体管生长工艺对

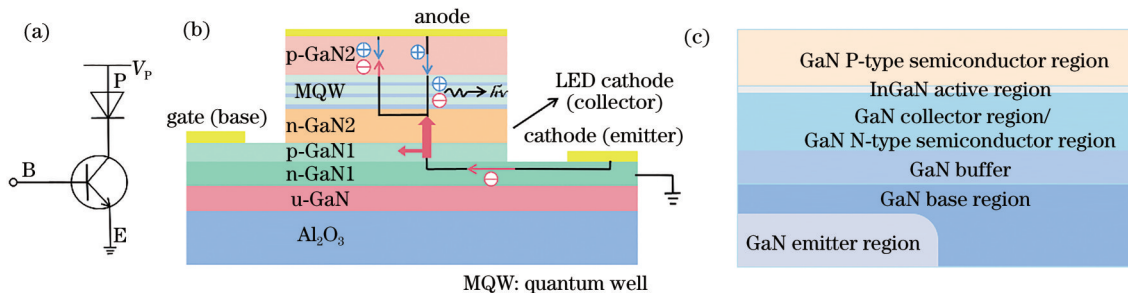


图 1 LET 原理图。(a)等效电路示意图;(b)器件结构示意图;(c)仿真模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of light-emitting triode (LET). (a) Equivalent circuit of LET; (b) device structure of LET; (c) simulation model of LET

LED 发光性能的影响。LET 包含栅极(基极)、阴极(发射极)以及阳极 3 个电极。以 npn 型 BJT 为例,有意识地把基区 p-GaN1 做得很薄,并通过构建 GaN 异质结形成二维电子气等方式,使发射区的多数载流子浓度大于基区,利用三极管的电流放大作用,通过三极管基区的一个较小电流,在集电极产生一个较大电流信号,并注入到 LED 发光区,降低传统 LED 的驱动电压,提高发光效率。设定阴极接地,给定阳极电压和栅极电压,当给定的电压满足 BJT 发射结正偏、集电结反偏的条件时,n-GaN1 层的电子通过 p-GaN1 向 n-GaN2 迁移,由于 p-GaN1 厚度较薄且属于较轻掺杂,大部分电子运动到 n-GaN2 区域,在电场的作用下,n-GaN2 区域和 p-GaN2 区域的电子空穴运动到量子阱(MQW)区域进行复合发光。此结构可以通过栅极电压控制在 p-GaN1 区域复合的电子数量进而控制流入 n-GaN2 区域的电子数量,进一步实现对 LED 发光效率的控制。最终实现通过栅极一个小功率信号就可以在发光区有较大的载流子注入,无需复杂功率放大电路,也可避免金属键合产生的寄生电容、电阻和电感。

为研究各端口输入因素对器件性能的影响,使用有限元仿真软件对 LET 器件结构进行模拟仿真,同时与具有相同参数的 LED 结构进行对比研究。图 1(c)为 LET 的器件仿真结构模型。如图所示,LED 结构垂直集成在 BJT 上方,器件的发射极设置在发射区,基极设置在基区,阳极设置在最上方的 p 型半导体层上,LED 和 BJT 共用一个 n 型半导体层。固定一个阳极电压,通过改变基极电压的大小使得器件的发射结正偏、集电结反偏,基区小幅度的电流增加能够使得集电极的电流大幅度增大,进入复合区的电子增多,提高器件的发光效率。在后续研究中,令基极电压为 V_B ,基极电流为 I_B ,发射极电流为 I_E ,阳极电压为 V_p ,考虑发光时复合电流后的阳极电流为 I_p 。LET 器件结构从下至上依次包括 0.5 μm 厚的 n 型 GaN(掺杂浓度为 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$)、200 nm 厚的 p 型 GaN(掺杂浓度为 1×10^{17})、300 nm 厚的 n 型 GaN 缓冲区(掺杂浓度为 1×10^{16})、1.5 μm 厚的 n 型 GaN 层(掺杂浓度为 1×10^{18})、50 nm 厚的 InGaN 以及 1 μm 厚的 p 型 GaN(掺杂浓度为 1×10^{18}),器件的宽度为 6 μm 。为了方便计算,在 LED 结构部分只采用单层有源区,没有考虑复杂的发光量子阱结构以及用于增强 LED 发光性能的功能层。

在仿真软件中对 LET 进行二维建模,为研究 LET 模型的电学特性,仿真时遵循的是泊松方程和载流子连续性方程^[25]:

$$\nabla \cdot (\epsilon_y \nabla V) = q(n - p + N_A^- - N_D^+), \quad (1)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{1}{q} \nabla \cdot j_n - U_n, \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \nabla \cdot j_p - U_p, \quad (3)$$

式中: ϵ_y 为介电常数; q 为电荷量; N_D 为电离施主浓度;

N_A 为电离受主浓度; n 和 p 分别是半导体材料中电子和空穴浓度; j_n 、 j_p 分别为电子和空穴总电流密度; U_n 和 U_p 分别表示电子和空穴的复合率。同时引入了光跃迁、俄歇复合以及 Shockley-Read-Hall(SRH)模型。

对于模型的性能研究,量子效率常常用来表述 LED 的发光效率,量子效率分为外量子效率(η_{EQE})和内量子效率(η_{IQE}),外量子效率由内量子效率和光提取效率组成,有

$$\eta_{\text{EQE}} = \eta_{\text{IQE}} \cdot \eta_{\text{Extraction}}, \quad (4)$$

而内量子效率由 $\eta_{\text{Radiative}}$ 和电流注入效率 $\eta_{\text{Injection}}$ 组成,有

$$\eta_{\text{IQE}} = \eta_{\text{Radiative}} \cdot \eta_{\text{Injection}}, \quad (5)$$

辐射效率是量子阱中复合电流的部分,复合导致了光子的产生,有

$$\eta_{\text{Radiative}} = \frac{R_{\text{sp}}}{R_{\text{sp}} + R_{\text{non_rad}}}, \quad (6)$$

式中: R_{sp} 为自发发射辐射复合率; $R_{\text{non_rad}}$ 为非辐射复合率,模型中主要研究了俄歇复合和陷阱辅助复合。其中:

$$R_{\text{non_rad}} = A \cdot N + C \cdot N^3, \quad (7)$$

式中: A 为陷阱辅助单分子复合系数; C 为俄歇复合系数; N 为有源区的载流子密度^[26]。电流注入效率是指注入电流在量子阱有源区中以辐射和非辐射方式复合的部分。因此有源区的辐射效率和电流注入效率都取决于电流注入水平,而 LET 模型有源区的电流注入取决于集电区的电流大小,这和基区宽度有很大的关系,而这是由三极管的特性决定的。

3 仿真结果与分析

3.1 阳极电压对器件开关性能的影响

在器件的仿真中,为研究基极电压对器件性能的影响,阳极电压取一定值。为确定这一固定电压的最佳取值,进行仿真研究,令阴极接地,给定不同的阳极电压,观察仿真中各端口电流随基极电压的变化。图 2(a)~2(e)为固定阳极电压 V_p 为 4、5、6、7、8 V 时基极电流 I_B 和阳极电流 I_p 随着基极电压 V_B 变化的情况。从图 2(a)中可以看出当基极电压约为 3 V 时器件开启,此时发射结正偏、集电结反偏,LET 器件开始工作在放大状态,随着 I_B 的增大, I_p 也随之增大;增加基极电压,当基极电压增大到约 3.6 V 时, I_p 不再随着 I_B 增加而增加,取此时电压为 V_N ,随后集电结由反偏转为正偏,器件不再工作在放大状态,从图 2(f)可以看出阳极电压越大, V_N 越大;同时从图 2(a)~2(e)可以看出当基极电压大于 6 V 后器件在关断状态时 I_B 大于 0,这是由于器件内出现了明显的漏电流。漏电流的存在破坏了 LET 器件的开关效果,使器件处于常开状态。为了保证器件的开关效果以及延长器件工作在放大区的状态,在后续的仿真研究工作中,设定阳极电压的取值为 $V_p=6 \text{ V}$ 。

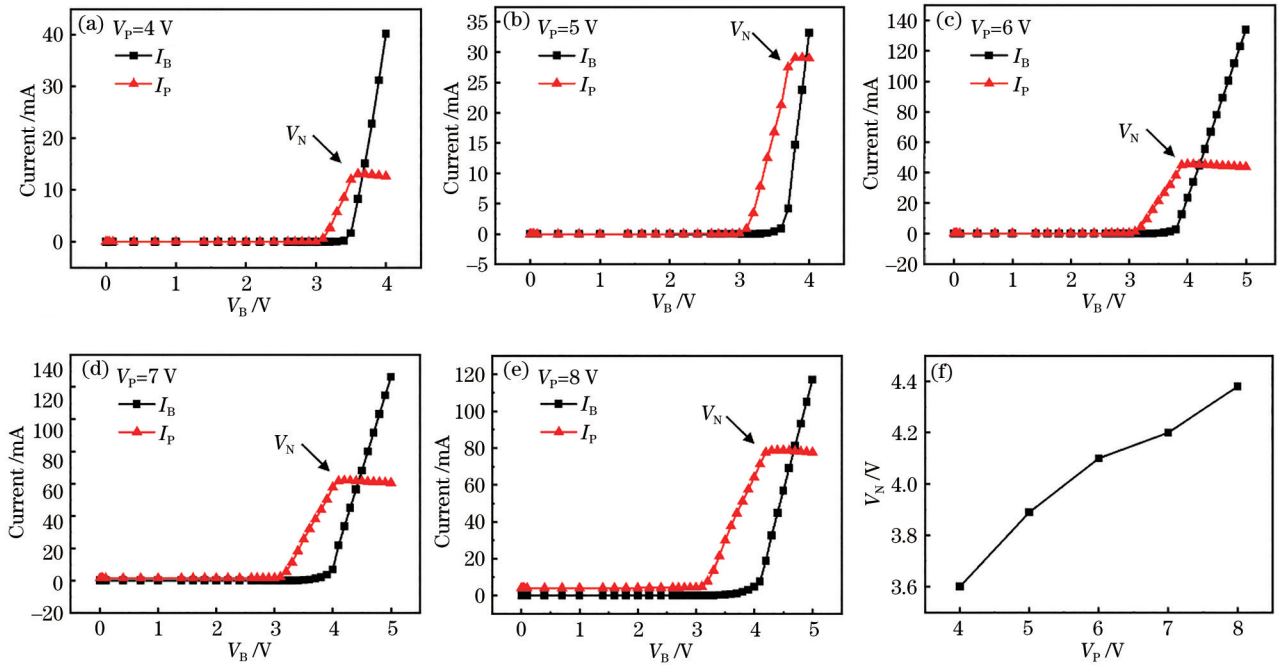


图 2 不同阳极电压下 LET 器件的电流电压关系。(a) 阳极电压为 4 V; (b) 阳极电压为 5 V; (c) 阳极电压为 6 V; (d) 阳极电压为 7 V; (e) 阳极电压为 8 V; (f) V_N 随阳极电压的变化

Fig. 2 Current-voltage relationship of LET devices under different anode voltages of (a) 4 V, (b) 5 V, (c) 6 V, (d) 7 V, and (e) 8 V, respectively; (f) V_N changes with anode voltage

3.2 LET 光电性能仿真研究

为探究 LET 模型电学特性以及内部载流子运输情况,对该器件的输入特性、电流电压特性(I-V)、电流放大系数(β)进行了分析。图 3 显示了 LET 器件的电学特性,图 3(a)为 LET 器件的各端口电流随着 B 端电压变化的变化,可以看出 LET 器件在输入电压大约为 3 V 时开始有输入电流的出现,这是由于 GaN 的材料特性决定的,当施加在晶体管 B、E 两端的电压超过 3 V 时,晶体管的发射结开始导通,器件工作在放大状态, I_P 的值大于 I_B 的值,这是三极管的电流放大作用所产生的效果。图 3(b)是 LET 的 Gummel 图,显示了基极电流和 LED 阳极电流的大小(其中纵坐标取了电流的对数)。图 3(c)直观地显示了 LET 的 I_P 和 I_B 比值随输入电流的变化,这一比值就是电流放大系数 β ,体现了器件的电流放大能力。

为研究 LET 器件的性能优越性,对 LED 和 LET 器件进行了对比仿真研究。图 4 是两个器件的性能对比图。首先对比两个器件的输入电压电流特性,图 4(a)是 LED 和 LET 同一端口的电流随输入电压的变化图,由图 4(a)可以看出, I_P (LED) 在电压为 2.5 V 左右开始出现,并且随着电压的增高缓慢增加,而 I_P (LET) 在电压大约为 3 V 时出现,并且能在较短的电压增幅内快速增加到几十毫安,这是由于 LET 的电流放大能力使得输入端电流在微安级别的改变调控了发光区域的电流。

对于显示器件来说,发光性能是无法忽视的,而光输出功率(LOP)和内量子效应(IQE)是衡量器件发光性能的重要指标之一。图 4(b)是两个器件的 LOP 随输入电压的变化,由于 LET 器件的开启电压较 LED 大,所以光输出功率也出现得较晚,但是 LET 器件的 LOP 增幅较快,并且当输入电压的值约大于 3.2 V 后,LET

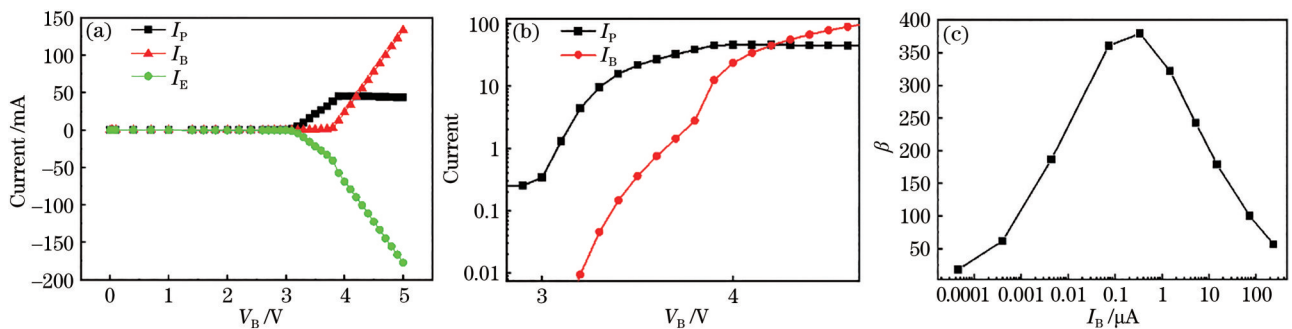


图 3 LET 器件的电学特性表征。(a) 电流电压关系; (b) I_B 和 I_P 的 Gummel 图; (c) 电流增益

Fig. 3 Electrical characterization of LET devices. (a) Current-voltage relationship; (b) Gummel diagrams of I_B and I_P ; (c) current gain

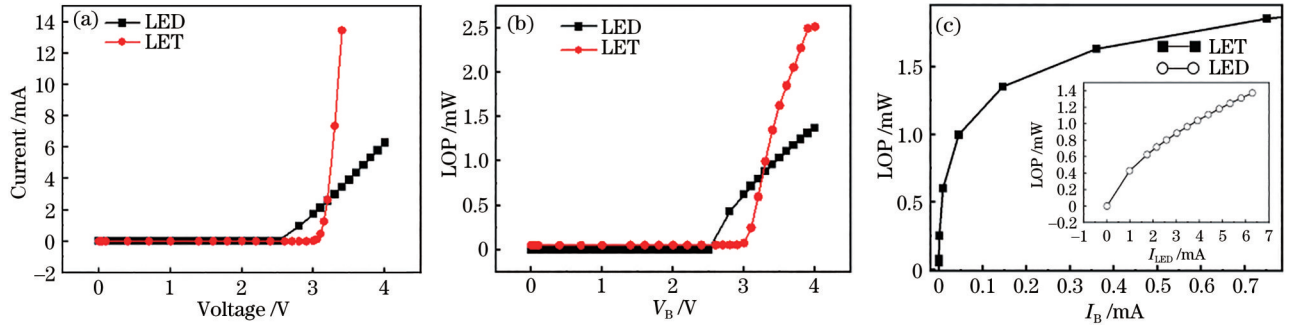


图 4 LED 和 LET 器件的性能对比。(a) 电流电压特性; (b) 光输出功率; (c) LET 的光输出功率

Fig. 4 Performance comparison of LED and LET devices. (a) Current and voltage characteristics; (b) optical output power; (c) optical output power of LET

器件的 LOP 大于 LED 器件。这可能是当电压升高到一定值之后, 由于三极管的放大作用, 运动到发光有源区的电子速度加快, 在发光有源区聚集的电子空穴变多的原因。图 4(c) 显示了 LET 器件的 LOP 随着输入电流的变化, 随着输入电流的增加, LOP 也随之增加, 当输入电流 I_B 增加到一定程度时, LOP 增加不再变化, 这是因为此时三极管不再处于放大状态, I_p 不再随着 I_B 的增加而增加。当 LET 的控制电流为 $4.283 \mu\text{A}$ 时, LOP 达到了 0.4 mW 左右, 此时的 IQE 为 0.1 左右, 而 LED 要达到这样的 LOP 时要求控制电流为 1.1 mA ,

由此可以体现 LET 器件的小电流控制作用。

3.3 基区厚度对 LET 性能的影响

传统 BJT 器件要求基区的厚度较薄, 便于集电极收集电子, 减少电流经过基区时的损耗。在器件的制备过程中, 过薄的基区厚度使得 LET 器件的制备存在着难以克服的障碍。本文通过仿真探索出基区厚度对器件性能的影响, 为芯片制备提供指导性意见。图 5(a) 显示了基区厚度分别为 100 、 150 、 200 、 250 nm 时 LET 器件的电压电流情况 (设定阳极电流为 6 V), 可以明显地看出当厚度为 100 nm 和 150 nm 时, 在输入电压

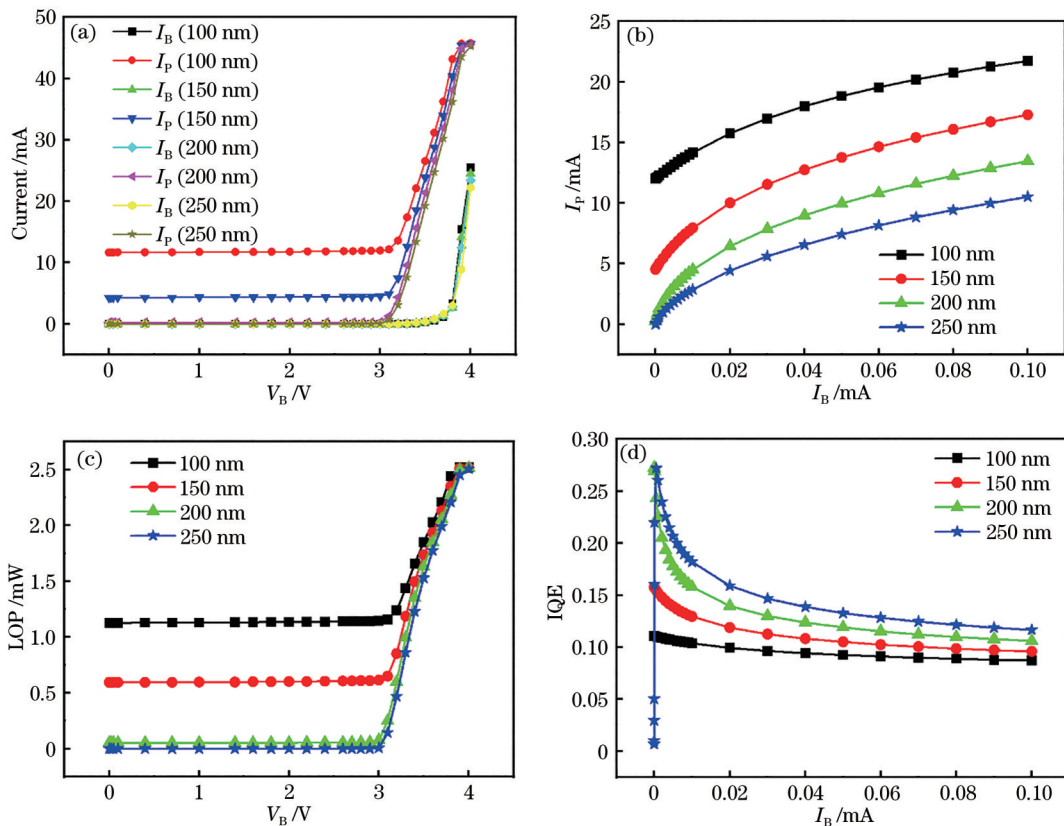


图 5 不同厚度的 LET 器件性能对比。(a) 电流电压特性曲线; (b) I_p 随 I_B 的变化曲线; (c) LOP 随 V_B 变化的曲线;

(d) IQE 随 I_B 变化的曲线

Fig. 5 Performance comparison of LET devices with different thicknesses. (a) Current-voltage curve; (b) I_p as function of I_B ;

(c) LOP as function of V_B ; (d) IQE as function of I_B

还没有达到开启电压时,器件出现了较大的漏极电流,这可能是由于基区厚度太薄,发射区的电子在电场的作用下直接进入了集电区。图 5(b)显示了不同厚度基区的电流比值,观察相同的 I_b 时不同厚度的 I_p 电流大小,体现了器件的电流放大效果,可以看出随着器件基区厚度的增加,电流放大特性随之减小。图 5(c)和 5(d)描述了器件的发光性能,图 5(c)显示了发光效率,随着基区厚度的增加,LET 的 LOP 随之减小;图 5(d)显示了 IQE,基区厚度越大,LET 的 IQE 峰值出现得越晚,后期随着输入电流的增大,IQE 开始随之衰减。从图 5(b)可以看出,随着基区厚度的增加,电流增益随之降低,LET 器件的电流调控能力也随之降低,但考虑到在实际制备工艺过程中,过薄的基区厚度对光刻工艺提出了很大的挑战,由于刻蚀过程中存在着误差,很难将刻蚀深度精确到过薄的基区,并引出电极。经过综合考虑,200 nm 的基区厚度是较为合适的选择。

4 结 论

基于相同的 GaN 材料和工艺制程体系,提出一种 GaN 放大三极管(BJT)和 LED 同质单片集成的器件,获得集发光、开关和控制等功能于一体的 LET 新思路,通过改变基极的电压输入使器件工作在放大区域,使得基极的小电流变化可以控制发射区流入发光层的电流大幅度改变,从而提升器件的控制效果。仿真结果表明,当基极输入电流的微安级变化就能实现传统 LED 毫安级电流变化所产生的效果。同时还研究了不同的基区厚度对器件调控性能和发光特性的影响,以便对器件的制备提供最合适的结构厚度,后续将会进一步研究其他结构参数对其性能的影响。

参 考 文 献

[1] Fan Z Y, Lin J Y, Jiang H X. III-nitride micro-emitter arrays: development and applications[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2008, 41(9): 094001.

[2] Cai Y F, Zou X B, Liu C, et al. Voltage-controlled GaN HEMT-LED devices as fast-switching and dimmable light emitters[J]. IEEE Electron Device Letters, 2018, 39(2): 224-227.

[3] 李晋闽, 刘志强, 魏同波, 等. 中国半导体照明发展综述[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0116002.
Li J M, Liu Z Q, Wei T B, et al. Development summary of semiconductor lighting in China[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0116002.

[4] Paranjpe A, Montgomery J, LEE S M, et al. Micro-LED displays: key manufacturing challenges and solutions [J]. SID International Symposium: Digest of Technology Papers, 2018, 49(2):597-600.

[5] 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.

[6] 胡雅萌, 张豆豆, 张建华, 等. CdSe/ZnS 量子点白光器件的热稳定性[J]. 光学学报, 2020, 40(8): 0823002.
Hu Y M, Zhang D D, Zhang J H, et al. Thermal stability of CdSe/ZnS quantum dot white light device[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(8): 0823002.

[7] 谈浩琪, 赵艳, 徐晨, 等. 准分子激光辐照法改善 GaN 外延片性质并增强 GaN 基 LED 发光性能[J]. 中国激光, 2015, 42(10): 1006004.
Tan H Q, Zhao Y, Xu C, et al. Enhancing luminescent properties of GaN-based LED and improving optical and electrical properties of GaN epitaxial wafers with excimer laser irradiation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(10): 1006004.

[8] Bouhamri Z, Virey E. 46.1: invited paper: MicroLED display technology trends and intellectual property landscape[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2021, 52: 559.

[9] 张晓芳, 陈宇博. P1.5 高清室内 LED 全彩显示屏设计与实现[J]. 机电工程技术, 2021, 50(1): 147-152.
Zhang X F, Chen Y B. Design and implementation of P1.5 HD indoor LED full color display[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2021, 50(1): 147-152.

[10] 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.

[11] Marion F, Bisotto S, Berger F, et al. A room temperature flip-chip technology for high pixel count micro-displays and imaging arrays[C]//2016 IEEE 66th Electronic Components and Technology Conference, May 31-June 3, 2016, Las Vegas, NV, USA. New York: IEEE Press, 2016: 929-935.

[12] Dai J, Yu B L, Yang L, et al. Microstructure and mechanical properties of ultrasonically assisted brazing of dissimilar Cu-Al alloys[J]. Science of Advanced Materials, 2020, 12(5): 733-739.

[13] Wu Y F, Keller B P, Keller S, et al. Very high breakdown voltage and large transconductance realized on GaN heterojunction field effect transistors[J]. Applied Physics Letters, 1996, 69(10): 1438-1440.

[14] Lee Y J, Yang Z P, Chen P G, et al. Monolithic integration of GaN-based light-emitting diodes and metal-oxide-semiconductor field-effect transistors[J]. Optics Express, 2014, 22(S6): A1589.

[15] 陈飞, 冯全源. 具有栅源间本征 GaN 调制层的 AlGaIn/GaN HEMT[J]. 半导体技术, 2021, 46(9): 694-700.
Chen F, Feng Q Y. AlGaIn/GaN HEMTs with intrinsic GaN modulation layer between gate and source[J]. Semiconductor Technology, 2021, 46(9): 694-700.

[16] 李天宇. SiC 和 GaN 电力电子器件的研究进展[J]. 微电子学, 2016, 46(5): 685-689.
Li T Y. Research progress of power electronic devices for SiC and GaN[J]. Microelectronics, 2016, 46(5): 685-689.

[17] Yoshida S, Suzuki J. High-temperature reliability of GaN electronic devices[J]. MRS Proceedings, 1999, 595:

- F99W4.8.
- [18] 孙润光, 刘宏宇. 一种无机发光二极管显示装置: CN101847646A[P]. 2010-09-29.
Sun R G, Liu H Y. An inorganic LED display device: CN101847646A[P]. 2010-09-29.
- [19] Li Z, Waldron J, Detchprohm T, et al. Monolithic integration of light-emitting diodes and power metal-oxide-semiconductor channel high-electron-mobility transistors for light-emitting power integrated circuits in GaN on sapphire substrate[J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(19): 192107.
- [20] Yan J B, Piao J L, Wang Y J. An enhancement mode MOSFET based on GaN-on-silicon platform for monolithic OEIC[J]. IEEE Electron Device Letters, 2020, 41(1): 76-79.
- [21] Hartensveld M. 61-5: fully monolithic GaN μ LED display system[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2021, 52(1): 880-883.
- [22] Liu Z J, Huang T D, Ma J, et al. Monolithic integration of AlGaIn/GaN HEMT on LED by MOCVD[J]. IEEE Electron Device Letters, 2014, 35(3): 330-332.
- [23] Lu X, Liu C, Jiang H X, et al. High performance monolithically integrated GaN driving VMOSFET on LED [J]. IEEE Electron Device Letters, 2017, 38(6): 752-755.
- [24] Hartensveld M, Zhang J. Monolithic integration of GaN nanowire light-emitting diode with field effect transistor [J]. IEEE Electron Device Letters, 2019, 40(3): 427-430.
- [25] 吴杰. GaN-HEMT 器件自热效应研究及其优化[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
Wu J. Study and optimum of self-heating effects in GaN-HEMT device[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014.
- [26] Zhao H P, Liu G Y, Zhang J, et al. Analysis of internal quantum efficiency and current injection efficiency in III-nitride light-emitting diodes[J]. Journal of Display Technology, 2013, 9(4): 212-225.