

可见光通信中GaN-LED PN结面积对调制带宽的影响机理

周政, 缪文南, 李亚, 龙晓燕, 李健

引用本文:

周政, 缪文南, 李亚, 等. 可见光通信中GaN-LED PN结面积对调制带宽的影响机理[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(7): 1494-1499.
ZHOU Zheng, MIAO Wen-nan, LI Ya, et al. Influence mechanism of GaN-LED's PN junction area on modulation bandwidth in visible light communication[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(7): 1494-1499.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/OPE.20202807.1494>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

可见光通信与双目视觉的室内定位

Indoor positioning based on visible light communication and binocular vision

光学精密工程. 2020, 28(4): 834-843 <https://doi.org/10.3788/OPE.20202804.0834>

并行翻转-正交频分复用调光控制室内可见光通信系统

PF-OFDM dimming control for indoor visible light communication systems

光学精密工程. 2015, 23(10z): 85-91 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152313.0084>

板上芯片集成封装发光二极管的光色检测系统

Photoelectric parameter measurement system for chip-on-board wafer level packaging LEDs

光学精密工程. 2016, 24(1): 39-44 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162401.0039>

基于和速率最大化的以用户为中心可见光通信最优预编码设计

Sum-rate maximization of user-centric visible light communication cells with zero forcing precoding

光学精密工程. 2020, 28(3): 686-694 <https://doi.org/10.3788/OPE.20202803.0686>

低相噪大面积平衡光电探测器

Balanced amplified photodetector with low phase noise and large area

光学精密工程. 2018, 26(2): 284-292 <https://doi.org/10.3788/OPE.20182602.0284>

文章编号 1004-924X(2020)07-1494-06

可见光通信中 GaN-LED PN 结面积 对调制带宽的影响机理

周 政^{1*}, 缪文南¹, 李 亚², 龙晓燕¹, 李 健²

(1. 华南理工大学 广州学院 电子信息工程学院, 广东 广州 510800;

2. 中山大学 电子信息与工程学院, 广东 广州 510275)

摘要:在可见光无线通信中,用于照明的 LED 光源的调制带宽很低,只有几 MHz,限制了基于 LED 光源的可见光通信的信息传输容量和速度。为构建高带宽 LED,研究影响 LED 调制带宽的因素和机制。设计 3 组 PN 结面积分别为 $200\ \mu\text{m}\times 800\ \mu\text{m}$, $300\ \mu\text{m}\times 900\ \mu\text{m}$ 和 $300\ \mu\text{m}\times 1\ 200\ \mu\text{m}$ 的 LED 芯片并倒装封装成 LED 器件,测试这 3 组器件的光电特性和调制带宽,并比较 3 组样品的电容曲线,分析调制带宽的主要影响因素之一——电容对 LED 器件的影响机制。实验结果表明:PN 结面积为 $200\ \mu\text{m}\times 800\ \mu\text{m}$ 的 LED 器件具有最小电容,且具有最高的 49.9 MHz 的 -3 dB 调制带宽。由于封装、测试电路等引起寄生电容对 LED 器件调制带宽有重要影响,通过优化器件倒装结构、LED 驱动电路等方法可以大幅度减少测试系统的寄生电容,提高 LED 器件的调制带宽。

关键词:可见光通信;发光二极管;PN 结面积;电容;-3 dB 调制带宽

中图分类号: TN510.50; O140.3099 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20202807.1494

Influence mechanism of GaN-LED's PN junction area on modulation bandwidth in visible light communication

ZHOU Zheng^{1*}, MIAO Wen-nan¹, LI Ya², LONG Xiao-yan¹, LI Jian²

(1. School of Electronic Information Engineering,

Guangzhou College of South China University of Technology, Guangzhou 510800, China;

2. School of Electronics and Information Technology,

Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China)

* Corresponding author, E-mail: zhouzheng@gcu.edu.cn

Abstract: Commercial Light-Emitting Diodes (LEDs) exhibit a -3 dB modulation bandwidth of only several MHz, which severely affects the information capacity and transmission in visible light communication. In this study, to fabricate an LED with high bandwidth, the influencing factors and mechanism of the modulation bandwidth of an LED device were investigated. Three LED chips with PN junction areas of $200\ \mu\text{m}\times 800\ \mu\text{m}$, $300\ \mu\text{m}\times 900\ \mu\text{m}$, and $300\ \mu\text{m}\times 1\ 200\ \mu\text{m}$ were designed and fabricated. By analyzing the photoelectric and modulation characteristics of the three LEDs, the

收稿日期: 2019-12-16; **修订日期:** 2020-01-13.

基金项目: 广东省重点基金资助项目(No. 2019B010132002); 广东省自然科学基金资助项目(No. 2017A030310465); 广东省创新强校工程资助项目(No. 2018KTSCX327)

relationship between the PN junction area and the modulation bandwidth was determined. Then, the capacitance-voltage curves of the three samples were compared, and the influence of the capacitance on the modulation bandwidth was analyzed. The results indicate that the LED with a PN junction area of $200\ \mu\text{m} \times 800\ \mu\text{m}$ exhibits the minimum capacitance, resulting in the maximum $-3\ \text{dB}$ bandwidth of $49.9\ \text{MHz}$ among the three LEDs. This demonstrates that the parasitic capacitance caused by package, LED drive circuits, etc., has a significant effect on the modulation bandwidth of LEDs. Thus, LED devices with high bandwidth can be fabricated by decreasing the parasitic capacitance of the LED.

Key words: visible light communication; light emitting diode; PN junction area; capacitance; $-3\ \text{dB}$ modulation bandwidth

1 引言

在过去 20 年来,随着 III 族氮化物 LED 技术的进步,LED 的光波波长覆盖了全部的可见光波段。目前,科研机构 and 照明公司正着力于设计和研制具有更高萃取效率的 LED 芯片并量产化,进一步提高 LED 器件的光效,降低成本,加快 LED 照明“千城万盏”计划的实现^[1]。GaN-LED 具有使用寿命长、光效高、无电磁辐射危害和维护成本低等优点,因此,GaN-LED 被认为是新一代的照明光源^[2]。

除了作为照明光源,利用 LED 发光时发出肉眼觉察不到的高速明暗闪烁信号进行无线通信,即新型的可见光通信,也引起了许多研究人员的兴趣。可见光通信通过将需要传输的数据加载到 LED 光源上并进行调制,让信息随可见光($380\sim 780\ \text{nm}$)在自由空间中传输,另一端的光电接收器接收到光并将光信号转变成电信号,即可实现信息的无线传输。可见光通信与其他无线通信(RF、毫米波和光波)相比,具有许多独特的优点:无电磁干扰,采用可见光作为信息载体,不会干扰采用电磁频谱通信的电子设备,如飞机、医疗设备、导航系统等;频谱资源丰富,比射频频谱资源多 10 000 倍,且无需申请即可使用;无电磁辐射;信息传输安全可靠,因为光无法穿透墙壁等实体建筑,因此所传输的信息在密闭空间内无泄露的风险^[3]。

LED 器件的调制带宽($-3\ \text{dB}$)能够衡量 LED 的调制能力,直接关系到可见光通信系统的信道传输容量和传输速率,是衡量 LED 通信性能的一个重要参数和关键指标。如何提升 LED 器

件的调制带宽,是实现 LED 器件高速通信的关键技术之一。目前,商业化的白光 LED 光源一般采用在蓝光 LED 芯片上涂覆 Ce:YAG 荧光粉得到白光,而 YAG 荧光粉的响应速度很低,LED 的调制带宽非常低,只有几 MHz,低的调制带宽限制了 LED 在可见光通信系统中的应用和发展。因此,研究人员采取多种方法来提高 LED 的调制带宽。Huang 等采用蓝色过滤片滤掉响应慢的黄光部分,从而将 LED 的 $-3\ \text{dB}$ 调制带宽从 $10\ \text{MHz}$ 提高到 $60\ \text{MHz}$ ^[4]。缩小 LED 的 PN 结面积即构造 μLED 提高调制带宽。McKendry 等构造直径从 $14\sim 84\ \mu\text{m}$ 的 GaN 基 μLED 阵列,使 μLED 的调制带宽大于 $400\ \text{MHz}$ ^[5]。Liao 等研制了一个带有掺杂铝的氧化锌电流环绕孔径的蓝光 μLED ,可以实现 $225\ \text{MHz}$ 的调制带宽^[6]。Wun 等提出了一种发光波长在 $500\ \text{nm}$,尺寸为 $50\ \mu\text{m}$ 的 μLED ,其调制带宽约为 $400\ \text{MHz}$ ^[7]。构造具有等离子效应的 LED,利用等离子共振效应缩短载流子的寿命,从而提高 LED 的响应速度及调制带宽。Guina 等设计了一个位于光腔内并与 LED 的量子井发射波长共振的共鸣腔 LEDs(RCLEDs),使 LED 的调制带宽达 $200\ \text{MHz}$ ^[8]。Shi 等在量子阱厚度仅为 $5\ \text{nm}$ 且无掺杂的情况下使 LED 的 $3\ \text{dB}$ 带宽高达 $1\ \text{GHz}$ ^[9]。

缩小 LED 的 PN 结面积能获得较大的调制带宽,为了详细研究 LED 器件的 PN 结面积对 LED 调制带宽的影响机理,本文设计了 3 组不同 PN 发光面积的 LED 芯片 I 组 $200\ \mu\text{m} \times 800\ \mu\text{m}$, II 组 $300\ \mu\text{m} \times 900\ \mu\text{m}$ 和 III 组 $300\ \mu\text{m} \times 1200\ \mu\text{m}$ 。将芯片倒装封装成 LED 器件,通过测量这 3 组器件的光电特性和调制特性,比较 3 组 LED 器件的电容曲线,研究 LED 调制带宽的关键影响因

素,对研制高调制带宽的 LED 器件有借鉴意义。

2 实验装置

2.1 LED 芯片工艺及结构

本文共设计了 3 组不同 PN 结面积的 LED 芯片并倒装封装成 LED 器件。具体的芯片工艺流程参考文献[10]。芯片倒装封装过程参考文献[11]。3 组 LED 芯片形貌如图 1 所示。

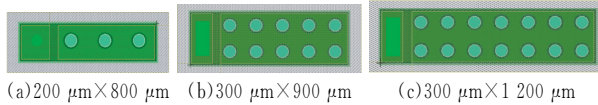


图 1 三种 PN 结面积 LED 芯片形貌

Fig.1 Schematic of LEDs with three PN junction areas

2.2 LED 调制特性测试系统

LED 器件在可见光通信中的调制特性测试系统如图 2 所示。系统由网分仪 (ROHDE & SCHWARZ ZNB8), 放大器, 偏置树 (mini-circuits ZX85-12 G+), LED 直流电源 (台湾茂迪 LPS-305) 和 PIN 光电探测器 (THOR-LABS APD210) 组成。测试过程为: 网络分析仪首先产生一个正弦信号, 经过偏置树 (bias-tree) 加载到 LED 光源上, LED 在直流电源偏置下发光, 加载了信号的可见光在自由空间传播。另一端的光电探测器 (PIN) 接收到光, 并把光信号转化成相应的电信号输入到网络分析仪。网络分析仪根据输出输入信号的功率衰减程度, 得到 LED 的调制带宽^[9]。

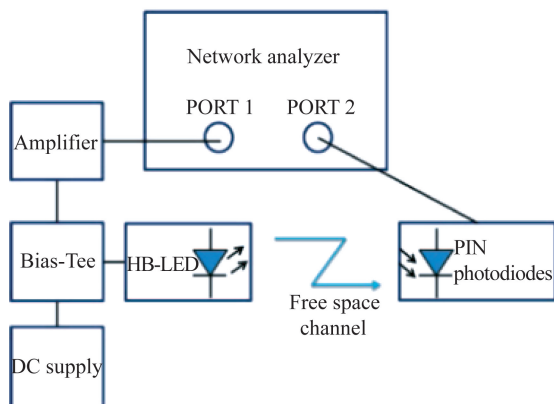
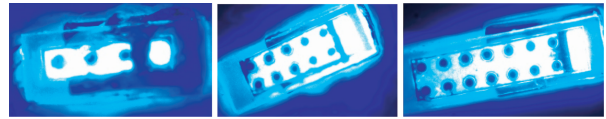


图 2 LED 器件的调制特性测试系统

Fig.2 Measuring system of modulation bandwidth of LEDs

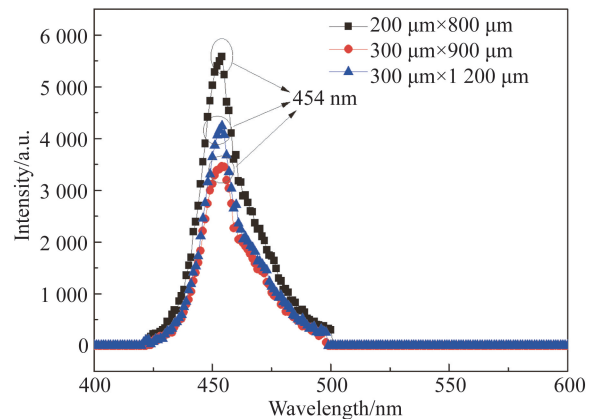
3 实验结果与分析

3 组 LED 在偏置电流 $I=10$ mA 时的发光情况和相应的电致发光光谱如图 3 所示, 3 组 LED 的峰值波长均在 454 nm。



(a) 偏置电流为 10 mA 时 LED 发光的照片

(a) Optical microscope images of three LEDs being operated at $I=10$ mA



(b) 发光光谱

(b) Electroluminescence spectra of three LEDs

图 3 三组 LED 器件的电致发光

Fig.3 Electroluminescence of three LEDs

3 组 LED 器件的电流-电压曲线 ($I-V$) 如图 4 所示。结果显示, 3 组 LED 器件的开启电压与工作电压 (@20 mA) 均与 LED 的 PN 结面积成反比。LED 的 PN 结面积越小, 在相同的偏置电流下, 具有更大的电流密度, 从而导致 LED 芯片的结温更高。而 LED 芯片的结温与开启电压与工作电压成正指数相关, 因此具有较小面积的 LED 器件具有较大的开启电压和工作电压^[12]。

3 组 LED 的光功率采用积分球 (HAAS 2000) 测试, 测试结果如图 5 所示。随着偏置电流的逐渐增大, 3 组 LED 器件的光功率也逐渐增大。当偏置电流为 170 mA 时, 3 组 LED 的最大的光功率依次为 188.6, 220.2 和 251.4 mW。对于 PN 结面积较大的两组 LEDII 和 LEDIII, 偏置

电流和光功率之间具有良好的线性关系。而对于 PN 结面积较小的 LEDI,当偏置电流增大到 110 mA时,光功率明显下降。导致这种现象的原因可能是:当 LED PN 结面积较大时,在同样的偏置电流下,LED 拥有较小的电流密度,有效缓解了电流的拥挤效应和器件的热效应,提升器件的光电性能^[13-14]。

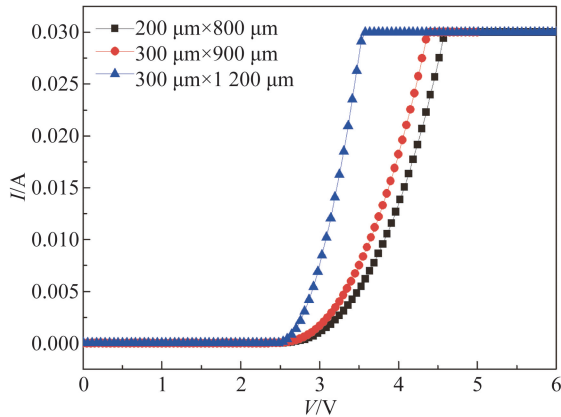


图 4 三组 LED 的 I-V 曲线
Fig. 4 I-V curves of three LEDs

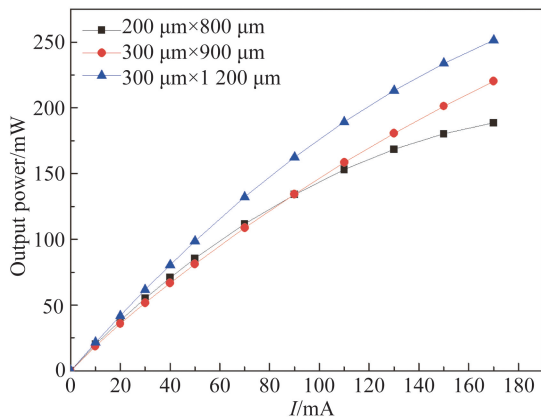


图 5 三组 LED 器件的电流-光功率曲线
Fig. 5 Current-power curves of three LEDs

调制带宽定义一般分为电带宽和光带宽两种。当器件的输出交流光功率下降至某一低频参考值的一半时,即幅值下降至最大值的二分之根号二倍时对应的频带宽度定义为器件的电带宽(-3 dB)。当幅值下降至最大值的一半时,对应的频带宽度定义为器件的光带宽(-6 dB),如图 6 所示。在可见光通信中,LED 的调制带宽经常采用电带宽(-3 dB)^[15]。

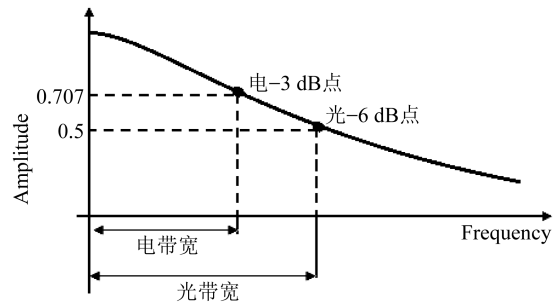


图 6 LED 调制带宽

Fig. 6 LED's bandwidth

三组器件的-3 dB 调制带宽测试结果如图 7 所示。当偏置电流逐渐增大到 170 mA 时,PN 结面积最小的 LEDI 具有最高的调制带宽 49.85 MHz;而面积较大的两组器件 LED II 和 LED III 具有较小的调制带宽,分别为 19.1 MHz 和 25 MHz。

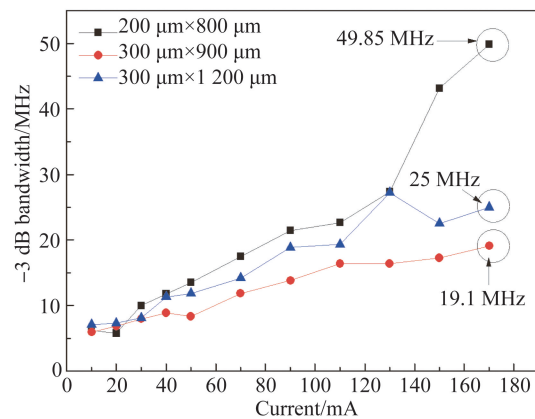


图 7 三组 LED 器件的-3 dB 调制带宽

Fig. 7 Modulation bandwidth at -3 dB of three LEDs

LED 器件调制带宽的影响因素一般有两种:一种是由载流子输运效应引起的电阻电容时间常数(RC);另一种是载流子的寿命。LED 的偏置电流越高,LED 芯片上的电流密度越高,较高的电流密度大幅提高了载流子的复合效率,减少了载流子的寿命,从而使 LED 的调制带宽在较高的偏置电流下具有较高的调制带宽^[16-18]。

如果 LED 器件的 PN 结面积较大,它具有较大的结电阻和结电容,因此,RC 时间常数常为器件调制带宽的主要影响因素^[19-21],且调制带宽 f 与 RC 常数的关系为:

$$f_{-3\text{ dB}} = \frac{1}{2\pi RC}, \quad (1)$$

式中: R 代表 LED 器件的电阻, C 代表 LED 器件的电容。为了证明 LED 器件的电容对调制带宽的影响并分析 LED 器件电容的组成,测试了 3 组 LED 器件的电容-电压曲线,如图 8 所示(图中红框代表器件导通之后的有效电容,彩图见期刊电子版)。

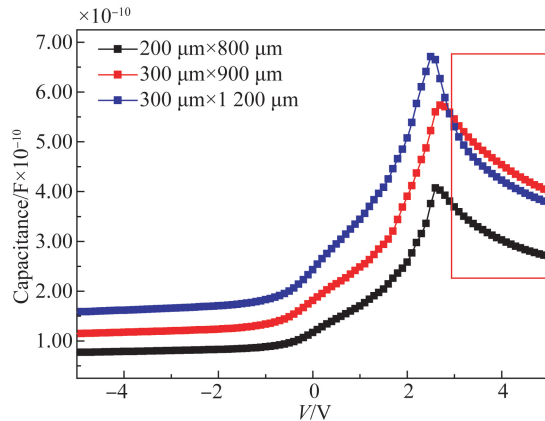


图 8 三组器件的 C-V 曲线($f=1$ MHz)

Fig. 8 C-V curves of three LEDs ($f=1$ MHz)

结果显示,构成 LED 的电容 C 一部分是由于耗尽层区域的空间电荷引起的结电容,还有一部分来源于器件封装,LED 驱动电路和实验装置等产生的寄生电容^[22-23]。当 LED 器件处于反向偏置区域时,结电容占主导地位,而结电容与器件的 PN 结面积成正比。当 LED 器件处于正向偏置时,刚开始偏置电压较低,LED 处于截止充电

状态,耗尽层宽度逐渐减小,结电容逐渐增大直到峰值。当偏置电压继续增大,LED 导通,由于载流子的复合,LED 的有效电荷量减少,使电容降低,最后逐渐趋于稳态。从图 8 可以看出,虽然 LED II 的 PN 结面积小于 LED III,但是它在工作区域的总电容略大于 LED III。LED II 具有较大的寄生电容,从而导致 LED II 的调制带宽略低于 LED III。如何通过优化 LED 倒装结构及 LED 驱动电路等参数,大幅度减少 LED 器件的寄生电容,有待进一步研究。

4 结 论

本文研究了 3 组不同尺寸 I 组 $200 \mu\text{m} \times 800 \mu\text{m}$ 、II 组 $300 \mu\text{m} \times 900 \mu\text{m}$ 和 III 组 $300 \mu\text{m} \times 1200 \mu\text{m}$ 蓝光 LED 器件的光电特性和调制特性,分析并验证了电容对 LED 器件调制带宽的影响。当偏置电流为 170 mA 时,3 组 LED 器件的光功率依次为 188.6, 220.2 和 251.4 mW, -3 dB 调制带宽分别为 49.85, 19.1, 25 MHz。可以看出,LED I PN 结面积最小,器件具有最小的电容,从而使其调制带宽最高。LED II 相对 LED III 的 PN 结面积较小,但是由于封装、测试电路等引起的寄生电容较大,它的调制带宽低于 LED III,证明了寄生电容对 LED 器件调制带宽的影响,为设计高带宽的 LED 光源具有借鉴意义。

参考文献:

- [1] 金鹏,喻春雨,周奇峰,等. LED 在道路照明中的光效优势 [J]. 光学精密工程, 2011, 19(1): 51-55.
JIN P, YU CH Y, ZHOU Q F, *et al.*. Superior application of LED to street light [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(1): 51-55. (in Chinese)
- [2] BALEJA R, SUMPICH J, BOS P, *et al.*. Comparison of LED properties, compact fluorescent bulbs and bulbs in residential areas [C]. *16th Int. Scientific Conf. on Electric Power Engineering (EPE)*, 2015: 566-571.
- [3] WANG C X, HAIDER F, GAO X Q, *et al.*. Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks [J]. *IEEE Commun. Mag.*, 2014, 52(2): 122-130.
- [4] HUANG X X, CHEN S Y, WANG Z X, *et al.*. 2.0-Gb/s visible light link based on adaptive bit allocation OFDM of a single phosphorescent white LED [J]. *IEEE Photonics J.*, 2015, 7(5): 1-8.
- [5] 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. Light. Technol.*, 2012, 30(1): 61-67.
- [6] LIAO C L, CHANG Y F, HO C L, *et al.*. High-speed GaN-based blue light-emitting diodes with gallium-doped ZnO current spreading layer [J]. *IEEE Electron Device Lett.*, 2013, 34(5): 611-613.
- [7] WUN J M, LIN C W, CHEN W, *et al.*. GaN-based miniaturized cyan light-emitting diodes on a patterned sapphire substrate with improved fiber

- coupling for very high-speed plastic optical fiber communication [J]. *IEEE Photonics J.*, 2012, 4(5):1520-1529.
- [8] GUINA M, ORSILA S, DUMITRESCU M, *et al.*. Light-emitting diode emitting at 650 nm with 200-MHz small-signal modulation bandwidth [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2000, 12(7):786-788.
- [9] SHI J W, CHI K L, WUN J M, *et al.*. III-nitride-based cyan light-emitting diodes with GHz bandwidth for high-speed visible light communication [J]. *IEEE Electron Device Lett.*, 2016, 37(7): 894-897.
- [10] ZHOU Z, YAN B, TENG D D, *et al.*. Improving the -3 dB bandwidth of medium power GaN-based LEDs through periodic micro via-holes for visible light communications [J]. *Optics Communications*, 2017, 392: 175-179.
- [11] ZHOU Z, YAN B, MA X J, *et al.*. GaN-based mid-power flip-chip LED with high -3 dB bandwidth for visible light communications [J]. *Applied Optics*, 2018, 57: 2273-2279.
- [12] JIN S X, SHAKYA J, LIN J Y, *et al.*. Size dependence of III-nitride microdisk light-emitting diode characteristics [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, 78(22): 3532-3534.
- [13] PIPREK J. Efficiency droop in nitride-based light-emitting diodes [J]. *Phys. Status Solidi A*, 2010, 207(10): 2217-2225.
- [14] MEYAARD D S, SHAN Q F, CHO J, *et al.*. Temperature dependent efficiency droop in GaInN light-emitting diodes with different current densities [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 100(8): 081106.
- [15] 迟楠. LED 可见光通信技术 [D]. 北京:清华大学出版社, 2014.
- CHI N. *LED Visible Light Communication Technologies* [D]. Beijing: Tsinghua University Press, 2014. (in Chinese)
- [16] SAUL R H. Recent advances in the performance and reliability of InGaAsP LED's for lightwave communication systems [J]. *IEEE T. Electron. Dev.*, 1983, 30(4): 285-295.
- [17] LAU E K, LAKHANI A, TUCKER R S, *et al.*. Enhanced modulation bandwidth of nanocavity light emitting devices [J]. *Optics Express*, 2009, 17(10): 7790-7799.
- [18] GREEN R P, MCKENDRY J J D, MASSOUBRE D, *et al.*. Modulation bandwidth studies of recombination processes in blue and green InGaN quantum well micro-light-emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, 102(9): 091103.
- [19] CHO J, MAO A, KIM J K, *et al.*. Analysis of reverse tunnelling current in GaInN light-emitting diodes [J]. *Electron. Lett.*, 2010, 46(2): 156-157.
- [20] MURALIDHARAN S. *Light Emitting Diode Designs and Modulation Schemes for Dual Illumination and Visible Light Communication Applications* [D]. Ph. D thesis, Troy, NY, 2013.
- [21] RAJBHANDARI S, MCKENDRY J J D, HERNSDORF J, *et al.*. A review of gallium nitride LEDs for multi-gigabit-per-second visible light data communications [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2017, 32(2):023001.
- [22] RASHIDI A, NAMI M, MONAVARIAN M, *et al.*. Differential carrier lifetime and transport effects in electrically injected III-nitride light-emitting diodes [J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 122(3): 035706.
- [23] CHO J, *et al.*. Capacitance measurements of PN junctions: Depletion layer and diffusion capacitance contributions [J]. *Eur. J. Phys.*, 1993, 14:86-89.

作者简介:



周政(1979-),女,湖南益阳人,博士,副教授,2006年于华南师范大学获得硕士学位,2018年于中山大学获得博士学位,主要从事LED研制,LED在可见光通信中的应用等方面的研究。
E-mail: zhouzheng@gcu.edu.cn