光电器件

DOI: 10.16818/j.issn1001－5868.20241010001

GaN基Micro-LED芯片低频噪声特性研究

张腾飞[1]，王　伟[2*]，华文渊[3]

（1. 南京信息工程大学 电子与信息工程学院，南京 210044；2. 无锡学院 江苏省集成电路可靠性技术及检测系统工程研究中心，江苏 无锡 214105；3. 江南大学 集成电路学院，江苏 无锡 214122）

摘　要： 针对GaN基蓝光Micro-LED芯片，文章采用电流-电压（*I-V*）特性和电流噪声功率谱密度分析相结合的方法，系统研究该器件电流输运机制及其在不同电流注入条件下的低频噪声特性。研究结果表明：在低电流注入区间（1 nA＜*I*＜1 μA），低频噪声呈现产生-复合噪声和1/*f*噪声的叠加特性，其中1/*f*噪声仅在频率低于10 Hz时显著显现；在中值电流注入范围（6.6 μA＜*I*＜830 μA）且测试频率*f*低于1×10^3 Hz时，测得电流噪声斜率分别1.75，2.06，1.99和1.76。通过引入多尺度熵复杂度分析揭示噪声信号的非规律特征，证实该部分电流区间的噪声源主要来自电子-空穴对的产生-复合过程，而非缺陷辅助隧穿所引起。当注入电流增至1～10 mA范围时，串联电阻的热效应开始主导运输特性，导致电流随电压的指数增长关系发生偏离。此时，1/*f*噪声主要来源于串联电阻，对应的1/*f*噪声指数因子γ分别为1.53，1.42，1.37，1.24和1.03，逐渐接近于标准1/*f*噪声（$\gamma=1$）。

关键词： Micro-LED；正向电流；输运机制；多尺度熵；低频噪声

中图分类号： TN312.8　**文章编号：** 1001－5868(2025)02－0226－06

Low-Frequency Noise Characterization of GaN-Based Micro-LED Chips

ZHANG Tengfei[1], WANG Wei[2], HUA Wenyuan[3]

(1. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, CHN; 2. Jiangsu Province Integrated Circuit Reliability Technology and Testing System Engineering Research Center, Wuxi University, Wuxi 214105, CHN; 3. Jiangnan University, School of Integrated Circuits, Wuxi 214122, CHN)

Abstract: In this study, the current-voltage characteristics and current-noise power spectral density of GaN-based blue micro-LED chips are examined to investigate the current-transport mechanism and low-frequency noise behavior under different current injections. The results show that under low current injection (1 nA＜*I*＜1 μA), the low-frequency noise is primarily a superposition of G-R noise and noise, which occurs at a frequency of less than 10 Hz. The current noise slopes are 1.75, 2.06, 1.99, and 1.76 at intermediate current injections (6.6 μA＜*I*＜830 μA) and at a frequency of below 1×10^3 Hz. The noise-signal behavior is investigated based on the multiscale entropy complexity, which reflects the noise-signal irregularity, and suggests that the current noise under this current-injection range originates from electron and hole generation-complexation instead of from defect-assisted tunneling. Under high current injection (1 mA≤*I*≤10 mA), as the current

收稿日期：2024－10－10.

基金项目：南京信息工程大学滨江学院人才启动科研项目（2019r005，550219005）；企业横向项目（2023320205000114，2025320205000070）.

*通信作者：王　伟

increases, the series resistance is not negligible and the current no longer increases exponentially with the increase in voltage. Thus, the noise $1/f$ primarily originates from the series resistance and corresponds to noise exponent factors of 1.53, 1.42, 1.37, 1.24, and 1.03, which gradually approach that of standard $1/f$ noise ($\gamma=1$).

Key words: Micro-LED; forward current; transport mechanism; multiscale entropy; low-frequency noise

0　引言

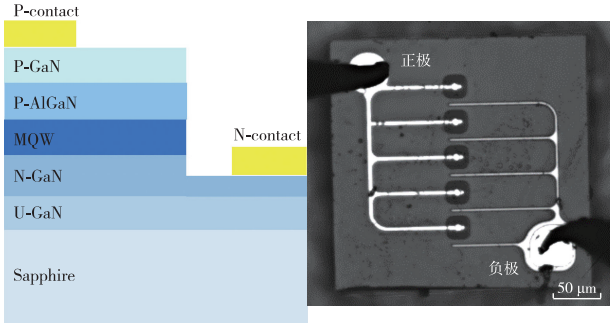
氮化镓(GaN)基微发光二极管(Micro-LED)作为下一代显示和照明领域的尖端技术,凭借其亮度高、功耗低、寿命长等优势,引起了广泛的研究和关注[1-3]。然而,GaN基Micro-LED的可靠性仍然是制约其规模化应用的关键因素之一。低频噪声行为作为一种灵敏的诊断工具,能够揭示材料和器件中的微观缺陷和潜在故障机制[4],因此在评估和优化GaN基Micro-LED的性能与可靠性方面发挥着重要作用。

近年来,针对GaN基Micro-LED的低频噪声行为的研究逐渐增多,这些研究主要集中在噪声功率谱密度的测量、噪声源的识别以及噪声与器件性能退化之间的关系等方面。通过深入分析$1/f$噪声(闪烁噪声)和产生-复合(G-R)噪声等不同类型的噪声成分,研究者们试图建立噪声特征与半导体器件中缺陷态密度、载流子输运机制以及非辐射复合过程之间的联系。2019年,王党会等探讨LED中载流子的产生与复合机制及低频噪声产生机制,研究显示,当注入电流在0.1~27 mA之间时,LED中的电流噪声主要表现为低频G-R噪声;当电流大于50 mA时,电流噪声表现为$1/f$噪声[5]。2020年,闫大为等对GaN基肖特基二极管的低频噪声行为进行研究,结果表明,只有当注入电流小于1 μA且频率小于10 Hz条件下,才会出现洛伦兹型噪声,此时电子的渡越时间取决于多个电子的连续捕获和释放过程;在高频率和电流条件下,主要表现为低频$1/f$噪声,此时电流的输送主要受到势垒高度随机波动的影响[6]。2021年,Xue等研究发现ZnO纳米线场效应晶体管(FET)在低至10 K的温度下表现出低频噪声特性。在温度范围为293~200 K间,归一化噪声功率谱密度(PSD)与$(g_m/I_d)^2$成正比,因此低频噪声是由平带电压波动引起的[7]。2023年,Jena等开发出基于低频噪声($1/f$噪声)技术分析的缺陷表征方法,成功实现GaN基HEMTs材料和器件质量、陷阱/缺陷浓度和可靠性预测。此外,该研究团队给出了不同温度和不同铝成分下漏极电流噪声的变化规律,还利用Hooge迁移率波动模型(HMF)研究了该器件的噪声性能[8]。

本文研究对象Micro-LED芯片基于第三代半导体GaN材料。尽管Micro-LED器件的研究热度持续攀升,但针对Micro-LED器件在电流噪声方面的研究较少。因此,本文从微观层面分析GaN基Micro-LED的低频噪声行为,并结合I-V曲线特性、多尺度熵复杂度和电流噪声功率谱密度的实验方法,对GaN基Micro-LED的低频噪声进行了研究。通过系统实验和分析,揭示其低频噪声源、传播机制以及与工作条件之间的关联。为解决Micro-LED中的低频噪声问题提供理论指导和技术支持,进一步推动Micro-LED技术的发展和应用。

1　实验

实验样品采用某公司自主研发的GaN基蓝光Micro-LED芯片,其发光波长为462 nm,外延片是在蓝宝石衬底(Sapphire)上,通过金属有机化学气相沉积(MOCVD)技术进行异质外延生长得到的,如图1(a)为结构示意,图1(b)为尺寸特征图。其中,外延片为多层结构,从上至下依次为P-GaN,MQW,N-GaN,U-GaN(缓冲层)以及蓝宝石衬底,采用传统的GaN基Micro-LED芯片工艺技术,将外



(a) 结构示意图　　(b) 尺寸特征图

图1　Micro-LED芯片

延片制作成25 μm×25 μm的Micro-LED芯片，导线结构中用金线焊接安装[9]。

蓝光Micro-LED芯片的电流-电压曲线测试采用的设备为Keithley 4200 A-SCS参数分析仪，其中*I-V*曲线测试范围是0～5 V，电压扫描步长为0.1 V；对Micro-LED的低频噪声测试采用的是无锡芯鉴半导体技术科技有限公司自主搭建的低频噪声测试系统（LFN-2000），其中Micro-LED噪声测试的频率范围为1～100 kHz，测试电流条件的范围为1 nA～10 mA。

2 结果与讨论

图2给出的是在室温下Micro-LED芯片的*I-V*半对数特性曲线。从图中可以看到，在小注入条件下（0 V＜V_F＜1.4 V），随着正向偏压V_F的增加，电流有逐渐减小的趋势；当V_F大于1.4 V时，*I-V*曲线在半对数下呈线性依赖关系，电流基本保持匀速提高到1×10^{-5} A；当V_F超过2.5 V时，曲线斜率变大，电流迅速增大至1×10^{-3} A后，其增长速度逐渐变慢，此时进入了串联电阻区域。

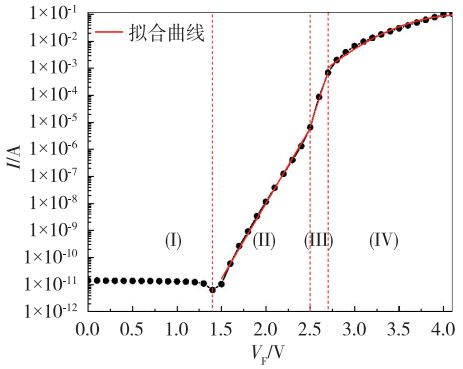


图2 蓝光Micro-LED芯片室温下的*I-V*曲线

根据上述结果，现将Micro-LED芯片正向电流特性划分为四个区域，具体如图2红色虚线所示。根据文献调研，当施加的电压$V\geqslant3kT/q$时，通过势垒区的电流可表示为[10]：

$$I=I_0\left\{\exp\left[\frac{q(V-IR_S)}{nk_BT}\right]-1\right\} \tag{1}$$

式中，I_0表示反向饱和电流，R_S表示串联电阻，n为理想因子，k_B是玻尔兹曼常数，T是开氏温度。理想因子的数值可以反映LED特定的电流形成机制，当$n=1$时，LED的电流主要表现于扩散电流；当$1<n<2$时，LED的电流由扩散和复合电流共同作用；当$n=2$时，LED的复合电流为主要表现形式。由于本文研究对象Micro-LED也作为发光器件，与传统LED的区别只在于芯片尺寸，故采取公式（1）进行Micro-LED的*I-V*曲线特性分析是合理的。

依据公式（1），针对图2中的第Ⅱ部分、第Ⅲ部分以及第Ⅳ部分分别展开了拟合操作。经分析得出，第Ⅱ部分的理想因子为4.22，原因是GaN外延层位错密度较高，量子阱的压电极化和自发极化效应作用较强。此条件下，载流子主要通过隧穿方式传递，此时的电流主要是隧道电流和空间电荷区域的复合电流构成，因而理想因子偏大[11]，该部分是隧穿电流发挥主导作用；第Ⅲ部分理想因子为1.57，处于1～2之间，在有源区中，载流子主要发生的是辐射复合，该部分由扩散电流和复合电流共同起主导作用；第Ⅳ部分理想因子的数值是12.9，该部分的电流处于串联电阻区，理想因子会随着电流的增大而持续增加，电流的增加速度明显变得缓慢，此时压降主要作用于串联电阻上，故串联电阻的影响起主要作用[12]。

通常，电子器件的低频噪声由三部分组成，包括白噪声、G-R噪声以及1/*f*噪声[13]，可表示为：

$$S_{I,\,noise}(f)=A+\frac{B}{f^{\gamma}}+\frac{C}{1+(f/f_0)^{\alpha}} \tag{2}$$

式中，A为白噪声的幅值；f为频率；B为1/*f*噪声的幅值；当$\gamma=1$时为标准的1/*f*噪声，γ为1/*f*噪声的指数因子；C和$f_0=1/2\pi\tau_0$分别为G-R噪声的幅值和转折频率；τ_0是G-R噪声的时间常数，α为G-R噪声的频率指数，当$\alpha=2$时，噪声为标准的G-R噪声[14]。不同的噪声成分能够反映出器件不同的曲线特性，其物理意义不同。因此，提取低频噪声中的各种噪声成分非常必要。为研究不同电流注入下Micro-LED的低频噪声特性，根据上述*I-V*曲线特性分析，可分为低电压区、中电压区和高电压区。从图1可知，低电压区处于1.4～2.5 V，中电压区处于2.5～2.7 V，高电压区大于2.7 V[15]。

图3给出的是Micro-LED芯片在低电流注入下的低频电流噪声，其中红色曲线为由公式（2）进行拟合的结果。由图中可以看出，Micro-LED低电流区的低频噪声幅值伴随电流的增大而增大，当施加的电流小于1 μA时，G-R噪声整体表现得最为明显，当频率小于10 Hz时，主要表现为1/*f*噪声。故

在低电流注入下，器件中的势垒可以看作为势垒电阻，故 Micro-LED 芯片的低频噪声受到禁带附近的深能级产生-复合中心和陷阱中心的影响[16-17]，主要表现为 G-R 噪声和 1/f 噪声的叠加。

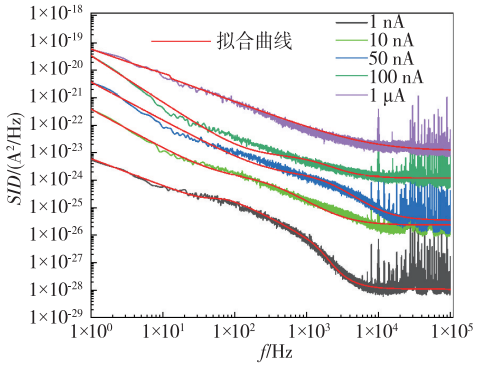


图 3　Micro-LED 低电流下电流噪声与频率的关系

根据图 3 的拟合数据，对 Micro-LED 低电流区的低频噪声参数进行提取，结果如表 1 所示。从表 1 能够看出，Micro-LED 芯片的白噪声幅值（A）G-R 噪声的时间常数逐渐变大。

图 4 给出的是 Micro-LED 芯片在中值电流注入下的低频电流噪声，此时电流注入处于图 2 中的第Ⅲ部分电流值，该部分主要以扩散电流和复合电流共同主导。从图 4 可以看出，随着电流的增大，低频噪声的幅值首先从 6.92×10^{-15} A²/Hz 增大到 4.46×10^{-14} A²/Hz，之后逐渐减小到 7.58×10^{-15} A²/Hz，没有连贯性，但在频率 $f<10^3$ Hz 下，电流噪声功率密度与频率呈线性依赖关系，其斜率分别为 1.75，2.06，1.99 和 1.76。这些数值都接近于 2，说明该部分电流注入下的电流噪声应起源于电子和空穴的产生-复合，而并非缺陷辅助隧穿所引起。针对频率中电流噪声幅变化不明显的规律，进一步采用时域多尺度熵复杂度分析方法[18]，来处理 Micro-LED 中值电流区的电流噪声数据。该方法能够反映出时间序列在不同时间尺度上的规律性。

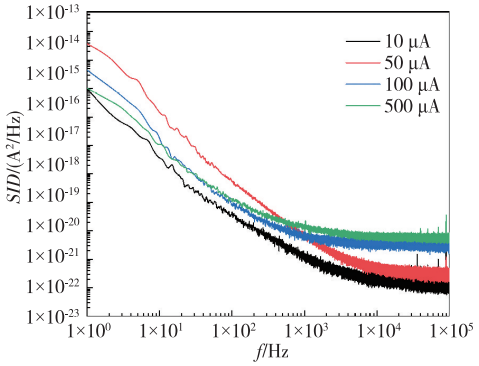


图 4　Micro-LED 中值电流区电流噪声与频率的关系

图 5 给出的是芯片在中值电流区不同电流下的多尺度熵与多尺度因子的关系图。由图可知，当注入电流为 10 μA 和尺度因子大于 6 时，多尺度熵值相比于其他序列的熵值是最大的，说明序列的复杂度最大，电流噪声信号越不规律，所包含的信息在多个尺度上最多[19]。当注入电流等于 50 μA 时，多尺度熵值达到最小，复杂度也最小，此时的噪声信号的规律性增强[20]，表明此时电流噪声机制主要来自扩散电流。当注入电流增加到 100 和 500 μA 时，受有源区散射增强影响，迁移率会有所变化，使得扩散电流噪声增大，多尺度熵值也增加，使得噪声信号变得不规律，其复杂程度变大。因此，中值电流区电流噪声的复杂度和有源区电流混乱的程度可以通过多尺度熵来反映。

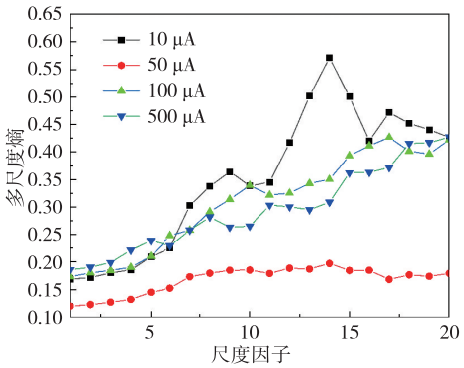


图 5　Micro-LED 中值电流区噪声信号的多尺度熵复杂度

表 1　Micro-LED 芯片低电压区低频噪声参数

低频噪声类型	测试电流/nA				
	1	10	50	100	1 000
白噪声	5.46×10^{-28}	2.35×10^{-26}	3.48×10^{-26}	1.20×10^{-24}	1.17×10^{-23}
1/f	$\frac{5.49\times10^{-24}}{f^{1.48}}$	$\frac{3.87\times10^{-22}}{f^{1.41}}$	$\frac{3.74\times10^{-21}}{f^{1.36}}$	$\frac{3.44\times10^{-20}}{f^{1.25}}$	$\frac{5.85\times10^{-20}}{f^{0.97}}$
G-R 噪声	$\frac{1.04\times10^{-24}}{1+\left(\frac{f}{4\,210}\right)^{1.62}}$	$\frac{1.24\times10^{-24}}{1+\left(\frac{f}{3\,220}\right)^{1.75}}$	$\frac{1.45\times10^{-24}}{1+\left(\frac{f}{1\,850}\right)^{1.92}}$	$\frac{6.31\times10^{-24}}{1+\left(\frac{f}{1\,380}\right)^{2.03}}$	—
噪声主要成分	G-R+1/f	G-R+1/f	G-R+1/f	G-R+1/f	1/f

在GaN基Micro-LED器件中，串联电阻上的压降随着电流的增加而变得无法忽略，电流随电压的增加不再按照指数增长方式，而是进入如图2中第Ⅳ部分所示的更为复杂的非线性区域。由于Micro-LED的p-GaN层在大电流作用下与串联电阻会发生界面态[21]，P-N结附近存在晶格常数失配，因此界面处出现许多悬挂键和弱键。悬挂键可能在大电流作用下释放或捕获电子，从而形成界面态，而弱键也可能断裂，产生额外的界面态，结区表面的悬挂键和弱键以同样的方式产生了新的界面态，此时产生的1/*f*噪声来源于串联电阻[22-23]。

图6给出的是大电流注入下的电流噪声和频率的关系图，随着电流的增加，电流噪声的幅值由2.71×10^{-13} A²/Hz提高到1.54×10^{-12} A²/Hz，电流噪声的功率谱密度与频率线性依赖性显著提高。利用公式(2)中的第二项进行拟合，分别得到不同电流下的低频噪声指数因子γ为1.53，1.42，1.37，1.24和1.03。由图可见，当电流进入到串联电阻区时，随着电流的增加，电流噪声越来越接近于标准的1/*f*噪声($\gamma=1$)，故大电流下Micro-LED芯片的噪声主要来源于串联电阻。

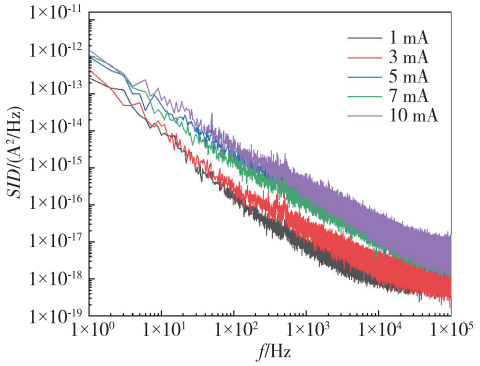


图6 Micro-LED高电流区电流噪声与频率的关系

3 结论

本文通过*I-V*曲线特性、分析多尺度熵复杂度以及测试电流噪声功率谱密度的实验方法，研究了GaN基Micro-LED的正向电流输运、中值电流区电流噪声的复杂度和低频噪声行为。Micro-LED芯片在低电流情况下，低频噪声主要由G-R噪声和1/*f*噪声的叠加而形成，此时空间电荷区禁带中附近的深能级产生-复合中心和陷阱中心是噪声的主要来源。在中值电流注入下，噪声信号在电流噪声时域中的多尺度熵复杂度变化表现出更为灵敏的规律性，这表明电流噪声起源于电子和空穴的产生-复合，从而使噪声信号的规律性发生变化。在大电流注入区，电流受串联电阻影响，不再遵循指数增长的模式，低频噪声也越来越趋向于标准的1/*f*噪声，此时噪声主要来源于串联电阻。本研究建立的基于低频噪声多维度分析(*I-V*特性、多尺度熵、功率谱密度)方法体系，为蓝光Micro-LED芯片在不同电流下的可靠性评估提供了有效的表征工具。

参考文献：

[1] Frandoli G, D' Acunzo M, Dan H, et al. Advanced screen printing: Application on microLED tiled display[J]. Journal of the Society for Information Display, 2022, 30(4): 263-270.

[2] Wu M C, Chung M C, Wu C Y. 3 200 ppi matrix-addressable blue MicroLED display[J]. Micromachines, 2022, 13(8): 1350.

[3] Li S, Song B, Peterson T, et al. MicroLED chromatic confocal microscope[J]. Optics Letters, 2021, 46(11): 2722-2725.

[4] Ursutiu D, Jones B K. Low-frequency noise used as a lifetime test of LEDs[J]. Semiconductor Science and Technology, 1996, 11(8): 1133-1136.

[5] 王党会，许天旱. 蓝紫光发光二极管中的低频产生-复合噪声行为研究[J]. 物理学报，2019，68(12)：279-284.
Wang Danghui, Xu Tianhan. Low-frequency generation-recombination noise behaviors of blue/violet-light-emitting diode[J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(12): 279-284.

[6] 闫大为，田葵葵，闫晓红，等. GaN肖特基二极管的正向电流输运和低频噪声行为[J]. 物理学报，2021，70(8)：362-368.
Yan Dawei, Tian Kuikui, Yan Xiaohong, et al. Forward current transport and noise behavior of GaN Schottky diodes[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(8): 362-368.

[7] Xue H, Shao Y, Yoon J, et al. Temperature-dependent low-frequency noise analysis of ZnO nanowire field-effect transistors[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2021, 68(7): 3532-3536.

[8] Jena P K, Das S, Bardhan S, et al. Low frequency noise analysis in AlGaN/GaN HEMTs[C]// 2023 1st International Conference on Circuits, Power and Intelligent Systems (CCPIS). IEEE, 2023: 1-4.

[9] 王 伟，张腾飞，王绶玙. GaN基Micro-LED反向漏电流失效机理分析[J]. 发光学报，2024，45(9)：1539-1546.
Wang Wei, Zhang Tengfei, Wang Shouyu. Analysis of failure mechanism of reverse leakage current in GaN-based Micro-LEDs[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2024, 45(9): 1539-1546.

[10] 江剑平，孙成城. 异质结原理与器件[M]. 北京：电子工业出版社，2010.

[11] 苏亚慧. 氮化镓基发光二极管的低频噪声研究[D]. 西安：

西安电子科技大学，2008.
Su Yahui. Low frequency noise study on GaN-based light emitting diodes[D]. Xi'an: Xidian University, 2008.

[12] Shah J M, Li Y, Gessmann T, et al. Experimental analysis and a new theoretical model for anomalously high ideality factors ($n \gg 2.0$) in GaN-based p-n junction diodes[J]. MRS Online Proceedings Library, 2003, 798(1): 689-694.

[13] Meneghesso G, Levada S, Pierobon R, et al. Degradation mechanisms of GaN-based LEDs after accelerated DC current aging[C]// Digest. International Electron Devices Meeting. IEEE, 2002: 103-106.

[14] Xu J, Zhang X, Yang H, et al. Enhancement of performance of GaN-based light-emitting diodes by insertion and optimization of n-InGaN/GaN composite current-spreading layers[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2014, 53(2): 022101.

[15] 王党会，许天旱，王　荣，等. InGaN/GaN多量子阱结构发光二极管发光机理转变的低频电流噪声表征[J]. 物理学报，2015，64(5)：97-102.
Wang Danghui, Xu Tianhan, Wang Rong, et al. Research on emission transition mechanisms of InGaN/GaN multiple quantum well light-emitting diodes using low-frequency current noise[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(5): 97-102.

[16] 吕家将. 高光效大功率蓝光InGaN/GaN LED芯片制造及其漏电机理研究[D]. 武汉：武汉大学，2018.
Lü Jiajiang. Study on manufacturing technology and leakage current mechanisms for high efficiency and high power InGaN/GaN light-emitting diodes[D]. Wuhan: Wuhan University, 2018.

[17] 苏亚慧. 氮化镓基发光二极管的低频噪声研究[D]. 西安：西安电子科技大学，2008.
Su Yahui. Low frequency noise study on GaN-based light emitting diodes[D]. Xi'an: Xidian University, 2008.

[18] Nafaa B, Cretu B, Ismail N, et al. Low-frequency noise measurements at liquid helium temperature operation in ultra-thin buried oxide transistors-physical interpretation of transport phenomena[J]. Solid-State Electronics, 2018, 150: 1-7.

[19] 何　亮，杜　磊，庄奕琪，等. 金属互连电迁移噪声的多尺度熵复杂度分析[J]. 物理学报，2008，57(10)：6545-6550.
He Liang, Du Lei, Zhuang Yiqi, et al. Multiscale entropy complexity analysis of metallic interconnection electromigration noise[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(10): 6545-6550.

[20] 郑近德，程军圣，胡思宇. 多尺度熵在转子故障诊断中的应用[J]. 振动、测试与诊断，2013，33(2)：294-297，342.
Zheng Jinde, Cheng Junsheng, Hu Siyu. Rotor fault diagnosis based on multiscale entropy[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33(2): 294-297, 342.

[21] Costa M, Goldberger A L, Peng C K. Multiscale entropy analysis of biological signals[J]. Physical Review E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 2005, 71(2): 021906.

[22] 吴庆丰. 含V形坑的Si衬底GaN基单量子阱绿光LED有源区研究[D]. 南昌：南昌大学，2019.
Wu Qingfeng. Study on the active region of V pit-containing Gan-based single quantum well green LED grown on Si substrates[D]. Nanchang: Nanchang University, 2019.

[23] 刘宇安，庄奕琪，杜　磊，等. 氮化镓基蓝光发光二极管伽马辐照的$1/f$噪声表征[J]. 物理学报，2013，62(14)：110-116.
Liu Yu'an, Zhuang Yiqi, Du Lei, et al. $1/f$ noise characterization gamma irradiation of GaN-based blue light-emitting diode[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(14): 110-116.

作者简介：

张腾飞(1996—)，男，贵州省遵义市人，硕士研究生，从事Micro-LED芯片失效分析方面的研究。

王　伟(1984—)，男，江苏省泰兴市人，博士，副教授，高级工程师，硕士生导师，主要从事半导体光电子及其可靠性方面的研究。