

蓝紫光发光二极管中的低频产生-复合噪声行为研究

王党会 许天旱

Low-frequency generation-recombination noise behaviors of blue/violet-light-emitting diode

Wang Dang-Hui Xu Tian-Han

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 128104 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20190189

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190189>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

Research on emission transition mechanisms of InGaN/GaN multiple quantum well light-emitting diodes using low-frequency current noise

物理学报. 2015, 64(5): 050701 <https://doi.org/10.7498/aps.64.050701>

GaN基通孔垂直结构的发光二极管失效分析

Failure analysis of GaN-based Light-emitting diode with hole vertical structure

物理学报. 2017, 66(4): 048501 <https://doi.org/10.7498/aps.66.048501>

基于量子点和MEH-PPV的白光发光二极管的研究

White light emitting diode based on quantum dots and MEH-PPV

物理学报. 2016, 65(6): 067301 <https://doi.org/10.7498/aps.65.067301>

GaN基高压发光二极管理想因子与单元个数关系研究

Research on the relationship between ideality factor and number of units of GaN-based high voltage light-emitting diode

物理学报. 2015, 64(1): 017303 <https://doi.org/10.7498/aps.64.017303>

电荷生成层中引入超薄金属Ag层对串联有机发光二极管性能的提升

Enhancement of tandem organic light-emitting diode performance by inserting an ultra-thin Ag layer in charge generation layer

物理学报. 2017, 66(1): 017302 <https://doi.org/10.7498/aps.66.017302>

# 蓝紫光发光二极管中的低频产生-复合噪声行为研究

王党会<sup>†</sup> 许天旱

(西安石油大学材料科学与工程学院, 西安 710065)

(2019年2月7日收到; 2019年4月8日收到修改稿)

本文对 GaN 基 InGaN/GaN 多量子阱结构、蓝紫光发光二极管 (light-emitting diode, LED) 的电流噪声进行了测试, 电流测试范围为 0.1—180 mA. 根据电流噪声的特点, 结合 LED 中载流子之间的产生-复合机制, 探讨了电流注入下 LED 中载流子的产生与复合机制和低频噪声产生的机理. 结论表明, 随着电流从 0.1 mA 逐渐增大到 27 mA, LED 中的电流噪声具有低频产生-复合 (generation-recombination, g-r) 噪声的特性; 当电流逐渐增大到 50 mA 及以上时, 电流噪声的行为接近  $1/f$  噪声. 采用电子元器件中公认的电流噪声模型, 拟合了低频电流噪声功率谱密度与频率之间的关系, 结合 LED 中载流子的输运机理和复合机制, 从理论上分析了 LED 在电流注入时 g-r 噪声幅值和转折频率的变化规律. 本文的结果提供了一种检测和表征多量子阱结构蓝紫光 LED 在电流逐渐增大过程中发光机制转变的有效手段, 为提高其发光量子效率提供理论依据.

**关键词:** 低频噪声, 发光二极管, 产生-复合噪声, 复合机理

**PACS:** 81.15.Kk, 78.55.Cr, 71.55.Eq

**DOI:** 10.7498/aps.68.20190189

## 1 引言

GaN 基宽禁带光电子半导体材料具有在 0.7—6.2 eV 之间的直接、连续可调的带隙特性, 是实现半导体蓝光及紫光/深紫外光发光二极管 (light-emitting diode, LED)、激光二极管和 GaN 基功率器件的关键材料. 目前, GaN 基 LED 多采用多量子阱 (multiple quantum well, MQW) 结构作为发光活性区. 在施加正向偏置时, 由于外加电压基本都在耗尽层上, 抵消并减弱了内建电场, 降低了势垒高度, 因此多数载流子就容易越过势垒注入对方形成少数载流子. 于是处于高能态的电子和空穴相遇复合, 同时把多余的能量以电磁波的形式释放, 从而实现固态发光. 基于 p-n 结理论的 LED 发光

原理如图 1 所示, 图中箭头所示为电子与空穴辐射复合发射可见光的传播方向. 发光活性区中少数载流子之间的辐射复合是引起 LED 发光的主要原因.

近 20 年来, 随着半导体制程尺寸的日益减小, 半导体器件中的纳米界面效应、异质结势垒以及杂质与缺陷等固有的物理现象, 已经成为俘获与发射载流子、进而影响载流子输运行为的主要因素<sup>[1-4]</sup>. 在电子元器件的工作过程中 (尤其是开启过程), 电子与空穴在电场作用下的扩散与漂移、陷阱能级或缺陷能级对载流子的俘获与发射, 以及杂质与晶格的散射作用等物理过程, 均能引起载流子数目的涨落和迁移率的涨落, 这些过程中蕴涵着丰富的噪声信息<sup>[5-8]</sup>. 我们知道, GaN 基 LED 的实质是 InGaN/GaN MQW 结构, 其发光区域主要集中在 p-GaN 的有源区, 载流子的溢出、发光活性区中的位错对

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: [wldhyxp@163.com](mailto:wldhyxp@163.com)

载流子的俘获以及 Auger 效应被认为是引起 LED 量子效率降低的主要原因. 当电流注入时, MQW 结构 LED 中的载流子复合、非辐射复合以及载流子数目涨落中包含的大量信息往往被许多研究者忽略. LED 中的产生-复合 (generation-recombination, g-r) 噪声起源于器件中陷阱对少数载流子的随机俘获或者发射, 引起了电流传导过程中载流子数目和迁移率的涨落. 当载流子被俘获时, 会诱发引起迁移率、扩散系数、电场强度、势垒高度以及空间电荷区宽度等方面的涨落<sup>[9-12]</sup>. 低频噪声作为一种有效的、敏感的无损检测技术, 其中的低频  $1/f$  噪声和 g-r 噪声中分别包含着半导体器件中载流子的扩散、漂移、涨落等输运信息和发光活性区中载流子的产生、复合以及被杂质缺陷的俘获等信息. 研究 g-r 噪声的产生机理、噪声幅值和特征频率等参数, 以及这些参数与电子流之间的关系等问题, 对深入了解 LED 的发光机理、LED 在大电流注入下的电流噪声特性, 以及在高电流密度注入下 LED 的质量与可靠性评估具有重要的研究意义. 本文采用低频噪声对 LED 高电流密度注入下的载流子输运行为和低频 g-r 噪声的行为之间的相关性进行了研究.

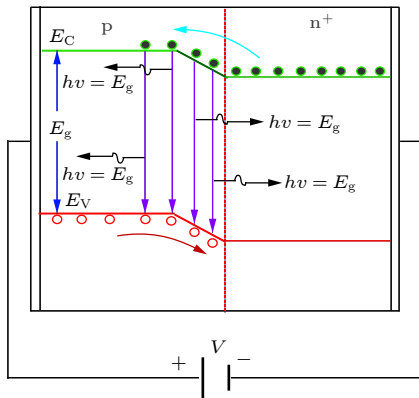


图 1 p-n 结型 LED 发光原理图  
Fig. 1. Principle schematic of p-n junction LED.

## 2 实验

实验所采用的 LED 均是采用金属有机化学气相沉积 (metal-organic chemical vapor deposit, MOCVD) 技术, 以异质外延的方式生长在蓝宝石衬底之上. 具体的生长工艺如文献<sup>[13]</sup>所示, 对 LED 的低频噪声测试是在西安电子科技大学噪声检测与无损诊断实验室完成的. 在 LED 的低频噪

声测试实验中, 测试频率的范围为 1—100 kHz, 测试电流的范围为 0.1—180 mA. 为了保证电流值的精确性, 对 LED 串联了一个可变电阻  $R_d$ , 其阻值范围为 10—10000  $\Omega$ ; 相应的前置偏压的范围为 0.1—3.0 V, 通过改变串联电阻的大小实现开启 LED 并逐渐增大电流的目的. 根据图 2 所示的低频噪声测试原理, 电流噪声的功率谱密度  $S_I$  (power spectral density, PSD) 为

$$S_I = \left( \frac{N_{V\_MEAS}}{R_F} \right)^2, \quad (1)$$

式中,  $S_I$  为测试的电流噪声 PSD (单位为  $A^2/Hz$ );  $N_{V\_MEAS}$  为测试的电压噪声 PSD (单位为  $V/\sqrt{Hz}$ ). 图 2 中 CAMP 为放大器;  $R_F$  为可调节并联电阻器; Digitizer 为数字化的数据处理设备. 通过 (1) 式和图 2, 可以获得不同电流下 LED 的噪声 PSD.

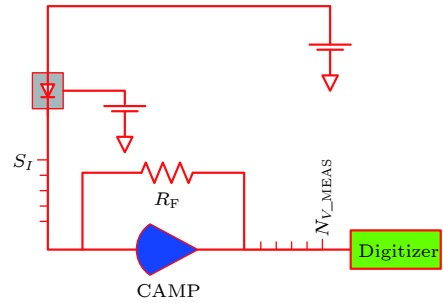


图 2 LED 低频噪声测试原理图  
Fig. 2. Measurement schematic of low frequency noise for LED.

## 3 实验结果与讨论

### 3.1 伏安特性

图 3 给出了室温下对 LED 进行光致发光 (photoluminescence, PL) 测试的结果. 从图 3 可以看出, LED 发光的峰值波长为 428 nm, 属蓝紫光范畴. 电学性能测试的伏安 ( $V$ - $I$ ) 特性曲线如图 4 所示. 从图 4 可以看出, 当施加约 2.52 V 的正向偏置时, LED 开始发光.

在正向偏置电压  $U$  下 ( $2 < U < 6$ ), LED 的理想因子  $\gamma$  为<sup>[14]</sup>

$$I - \frac{V - IR_s}{R_p} = I_s e^{\frac{q(V - IR_s)}{\gamma k_B T}}, \quad (2)$$

式中,  $R_p$  为并联电阻,  $R_s$  为串联电阻,  $I_s$  为反向饱和电流,  $k_B$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为开氏温度,  $I$  为流经二极管的电流,  $q$  为真空中的单位静电荷. 根据

文献 [15] 中的 LED 模型, 结合图 4 的曲线可知, 实验中 LED 的寄生电阻可忽略不计. 通常情况下,  $R_p$  的数量级远大于  $R_s$ . (2)式可改写为

$$\frac{dV}{dI} = R_s + \frac{\gamma k_B T}{qI}. \quad (3)$$

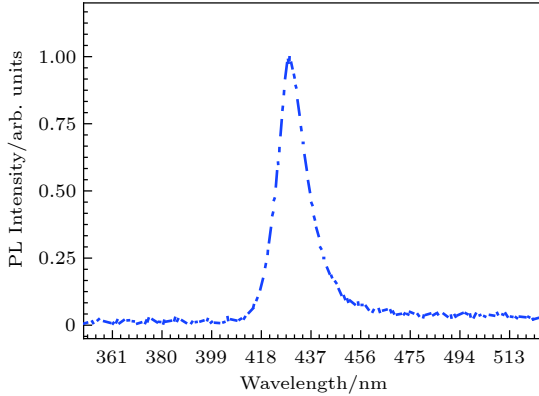


图 3 LED 室温 PL 测试

Fig. 3. PL measurement at room temperature.

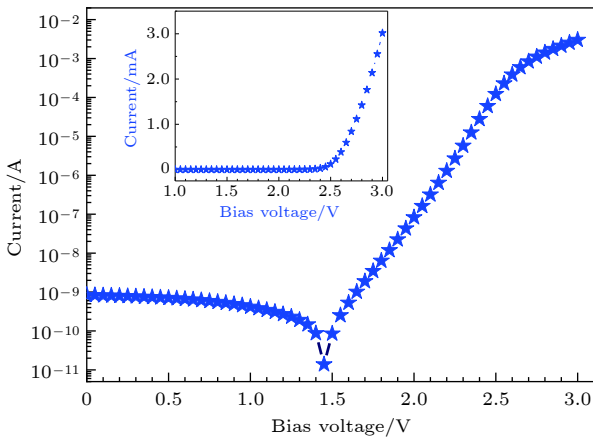


图 4 LED 的  $V$ - $I$  特性测试曲线

Fig. 4.  $V$ - $I$  characteristic transfer curve of LED.

根据 (3) 式对  $V$ - $I$  特性曲线进行拟合, 得到 LED 的理想因子  $\gamma = 5.43$ , 这表明 LED 内部存在串联电阻的特性. 众所周知, 当理想因子  $\gamma = 1$  时, LED 中扩散电流占主导地位; 当理想因子  $\gamma = 2$  时, LED 中复合电流占主导地位. 但是实际上, LED 的理想因子  $\gamma$  通常远大于 2. 高的理想因子不能用扩散理论和复合理论进行解释, 而必须采用隧穿理论进行解释, 此时隧穿电流变得更加重要. 在 LED 施加正向偏置时, 由于一部分电压降在 LED 的串联电阻  $R_s$  上, 使得外加电压引起的势垒降低会小一些, 结区周围的表面非辐射复合引起了一些附加电流 [15]. 因此, LED 正向  $V$ - $I$  特性用一个非理

想的二极管方程描述:

$$I = I_n + I_p + I_{nr} = (I_{n0} + I_{p0}) \left[ e^{\frac{q(V-IR_s)}{k_B T}} - 1 \right] + I_{nr0} \left[ e^{\frac{q(V-IR_s)}{\gamma k_B T}} - 1 \right], \quad (4)$$

式中,  $I_{nr0}$  是反向非辐射复合电流;  $I_n$ ,  $I_p$ ,  $I_{n0}$ ,  $I_{p0}$ ,  $I_{nr}$  分别为电子对电流的贡献、空穴对电流的贡献、正向电子电流、正向空穴电流及非辐射复合电流. 注入到工作区的一些载流子可能会发生非辐射复合而降低内量子效率, Auger 复合是一种本征的非辐射复合过程. 在 Auger 复合中, 电子空穴对释放的能量被多数载流子 (即 n 型材料中的电子和 p 型材料中的空穴) 吸收. 但是在发射可见光的宽禁带半导体中, Auger 过程相对较弱, 非辐射复合主要是来源于深杂质能级.

### 3.2 低频噪声特性

为了进一步研究电流注入下 LED 的低频噪声特性, 对 LED 分别施加了不同大小的电流 (0.1, 10, 27, 50, 80 和 180 mA), 并测量了不同电流注入下 LED 中的低频电流噪声, 测试结果如图 5 所示. 从图 5 可以看出, 随着测试电流的逐渐增加, LED 的低频电流噪声也逐渐增加. 当电流从 0.1 mA 逐渐增大到 27 mA 时, 电流噪声功率谱具有 g-r 噪声的特征, 而且随着电流的逐渐增大, g-r 噪声的特征逐渐消失. 当测试电流增加到 50 mA 时, 低频噪声的行为接近于标准的闪烁噪声 (即  $1/f$  噪声, 此时  $\gamma = 1$ ). 文献 [16, 17] 认为, 当电流越小 (小于 0.1 mA) 时, LED 低频电流噪声的行为具有接近产生 g-r 噪声的趋势, 引起这种噪声变化的原因

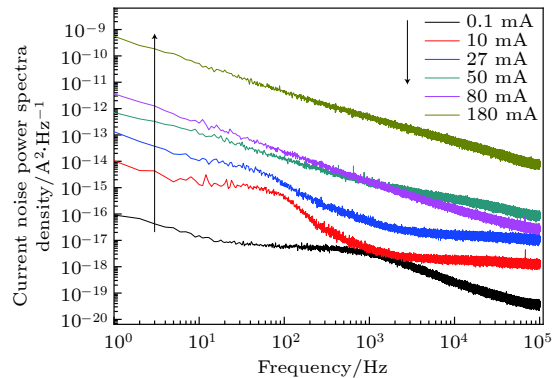


图 5 InGaN/GaN LED 的电流噪声 PSD 与频率的关系图

Fig. 5. Relationships between current PSD and frequency for InGaN/GaN LED.

是由于非辐射复合的隧穿过程, 这种非辐射复合的隧穿过程是由于扩展的缺陷体系延伸到了 LED 的光学活性区. 在低电流注入下, g-r 噪声在低频噪声中是主要的噪声机制, 它起源于 p-n 结势垒之间复合电流的涨落 [18–21].

从图 5 还可知, 在电流大于 27 mA 时, InGaN/GaN MQW LED 中低频  $1/f$  噪声的成分在逐渐增加; 而在电流为 0.1–27 mA 时, 低频噪声中的 g-r 噪声源的成分在逐渐降低. 一般情况下, 电子器件中的低频噪声是由三部分构成 [18–20], 如下式所示:

$$S_{I,\text{noise}}(f) = A + \frac{B}{f^\gamma} + \frac{C}{1 + (f/f_0)^\alpha}, \quad (5)$$

式中, 第一项  $A$  为白噪声的幅值;  $f$  为频率; 第二项为闪烁噪声 (flicker noise) 项,  $B$  为闪烁噪声的幅值,  $\gamma$  为闪烁噪声的频率指数因子, 当  $\gamma = 1$  时为  $1/f$  噪声, 表明载流子之间的产生与复合达到平衡; 第三项为 Lorentzian 噪声,  $C$  为 Lorentzian 噪声的幅值,  $f_0 = 1/(2\pi\tau_0)$  为 g-r 噪声的转折频率, 其中  $\tau_0$  为 Lorentzian 噪声的时间常数,  $\alpha$  为 Lorentzian 噪声的频率指数因子, 当  $\alpha = 2$  时为标准的 g-r 噪声. 采用 (5) 式对 LED 的电流噪声 PSD 进行频率范围为 1–100000 Hz 曲线拟合, 拟合曲线如图 6 所示, 低频噪声 (包括  $1/f$  和 g-r) 参数的提取结果如表 1 所列.

从表 1 可以看出, 随着电流的不断增大, 样品中白噪声的幅值 ( $A = 4K_BTR$ ) 变化很小, 这表明

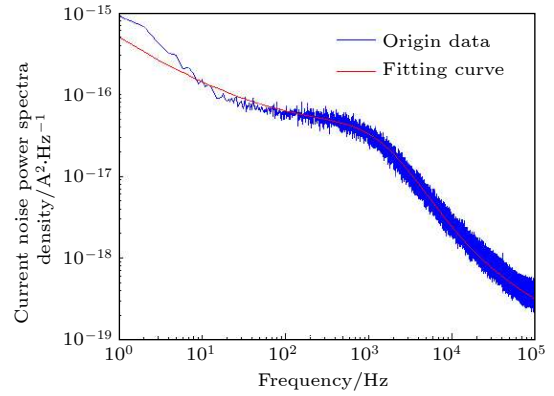


图 6 根据 (5) 式拟合 g-r 噪声参数

Fig. 6. Fitting results of g-r noise using Eq. (5).

整个测试系统的温度和样品的电阻保持稳定, 背景噪声的影响较小. 而  $1/f$  噪声的幅值  $A$  随着电流的增大而增大; 闪烁噪声的指数因子  $\gamma$  随测试电流的增大而逐渐从 0.65 逐渐增大到 0.83, 0.90, 0.95 和 1.09, 说明在大电流注入下, 样品中的低频噪声行为逐渐成为  $1/f$  噪声. 当电流从 0.1 mA 逐渐增大到 27 mA 时, 低频 Lorentzian 噪声的成分逐渐演进为 g-r 噪声 (Lorentzian 噪声的频率指数因子从 1.84 变化到 2.02), 且只有一个特征频率, 表明 LED 中的 g-r 噪声源自于禁带中的一个缺陷能级. 对于极性 MQW 结构 LED 而言, 在外加正向偏置电压时, 能带结构会发生倾斜, 对于费米能级的位置也将发生改变, 从而使杂质能级与费米能级交叉点的位置发生变化. 因此, g-r 噪声的特征频率发生

表 1 根据 (4) 式提取出的低频噪声参数

Table 1. Extraction results of low-frequency noise using Eq. (4).

低频噪声类型	测试电流/mA					
	0.1	10	27	50	80	180
白噪声	$5.14 \times 10^{-18}$	$1.10 \times 10^{-17}$	$6.12 \times 10^{-17}$	$2.36 \times 10^{-17}$	$9.23 \times 10^{-18}$	$9.23 \times 10^{-18}$
$1/f$ 噪声	$\frac{4.61 \times 10^{-16}}{f^{0.65}}$	$\frac{1.82 \times 10^{-15}}{f^{0.83}}$	$\frac{1.01 \times 10^{-13}}{f^{0.90}}$	$\frac{5.29 \times 10^{-13}}{f^{0.95}}$	$\frac{3.32 \times 10^{-12}}{f^{1.09}}$	$\frac{5.04 \times 10^{-11}}{f^{1.09}}$
g-r 噪声	$\frac{4.07 \times 10^{-19}}{1 + (\frac{f}{14000})^{1.84}}$	$\frac{7.38 \times 10^{-18}}{1 + (\frac{f}{9900})^{1.96}}$	$\frac{1.32 \times 10^{-17}}{1 + (\frac{f}{1560})^{2.02}}$			
低频噪声起源	$1/f + \text{g-r 噪声}$	$1/f + \text{g-r 噪声}$	$1/f + \text{g-r 噪声}$	$1/f$ 噪声	$1/f$ 噪声	$1/f$ 噪声

表 2 低频  $1/f$  噪声和 g-r 噪声参数与电流之间的指数关系

Table 2. Exponent relationships between parameters of  $1/f$  noise and g-r noise and measured currents.

低频噪声类型	测试电流/mA					
	0.1	10	27	50	80	180
$1/f$ 噪声幅值	$B = I^{3.834}$	$B = I^{7.370}$	$B = I^{8.285}$	$B = I^{9.436}$	$B = I^{10.4647}$	$B = I^{13.8273}$
g-r 噪声幅值	$C = I^{4.0980}$	$C = I^{8.5660}$	$C = I^{12.0212}$			
g-r 噪声时间常数	$\tau = I^{0.9978}$	$\tau = I^{2.3969}$	$\tau = I^{3.1520}$			



了改变, g-r 噪声的幅值逐渐从  $1.32 \times 10^{-19}$  增大到  $4.07 \times 10^{-17}$ . 从表 1 还可以看到, 对 g-r 噪声而言, 随着注入电流的逐渐增大, 特征频率变得越低, 这意味着 g-r 噪声的时间常数越来越大; 反之, 当杂质能级越靠近能带中间时, 由于杂质能级近似等于  $E_i$ , 即相当于本征状态  $n_0 = p_0 = n_i$ , 故  $f_0$  越小<sup>[21-23]</sup>.

根据表 1 的提取结果, 对  $1/f$  噪声和 g-r 噪声的参数与电流之间的相关性进行分析, 结果如表 2 所示.

从表 2 可以看出, 随着电流的逐渐增大,  $1/f$  噪声和 g-r 噪声的幅值  $B$  与电流  $I$  之间的相关性越来越大, 这与图 5 及文献中的结论是一致的. 图 7 对测试 LED 的电流噪声 PSD 涨落  $S_I/P$  与电流  $I$  之间的相关性进行了分析. 从整个测试电流的范围来看,  $S_I/P$  与电流  $I$  之间呈二次函数的关系, 但是在高电流范围内 (电流大于 10 mA 时), 两者之间具有良好的线性关系, 这与文献 [23, 24] 中的结论是一致的. 即在低电流阶段, LED 中的低频噪声主要来自于 g-r 噪声, 随着电流的增大,  $1/f$  噪声逐渐成为低频噪声中的主要起源.

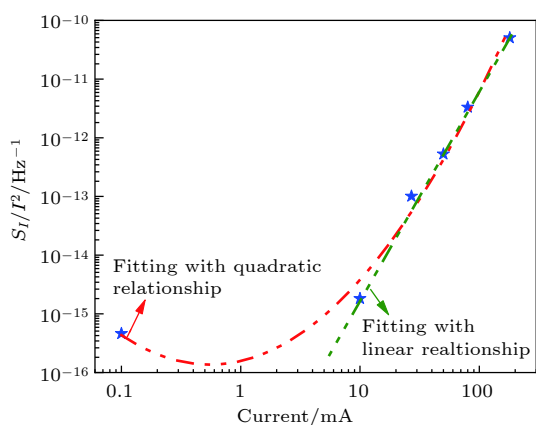


图 7 电流噪声 PSD 涨落  $S_I/P$  与电流  $I$  之间的关系演变  
Fig. 7. Fluctuation evolution relationships of current PSD  $S_I/P$  and current  $I$ .

## 4 结 论

本文对 LED 的电流噪声进行了测试, 电流范围为 0.1—180 mA. 根据电流噪声的特点, 结合 LED 中载流子的产生-复合机制, 通过对低频电流噪声 PSD 的拟合, 探讨了高电流注入下 LED 的载流子产生与复合机制. 结果表明, 随着电流从 0.1 mA 逐渐增大到 27 mA, LED 中的电流噪声具有低频

g-r 噪声的特性; 当电流逐渐增大到 50 mA 时, 电流噪声的行为开始接近于低频  $1/f$  噪声. 根据载流子的复合机制, 结合 LED 中低频噪声的结电流模型, 从理论上分析了 LED 在高电流注入时的转折频率的变化规律. 本文的结果提供了一种表征 InGaN/GaN MQW LED 发光机制转变的有效手段, 为提高其发光量子效率提供理论依据.

## 参考文献

- [1] Ashutosh K, Kumar V, Singh R 2016 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **49** 47LT01
- [2] Simoen E, Anabela V, Philippe M, Nadine C, Cor C 2018 *IEEE Trans. Electron Dev.* **65** 1487
- [3] Hu H P, Zhou S J, Wan H, Liu X T, Li N, Xu H H 2019 *Sci. Rep.* **9** 1
- [4] Nafaa B, Cretu B, Ismail N, Touayar O, Carin R, Simoen E, Veloso A 2018 *Solid State Electron.* **150** 1
- [5] Islam A B M H, Shim D S, Shim J I 2019 *Appl. Sci.* **9** 871
- [6] Kazuhiro O, Fumitaka I, Tomomasa W, Kenichi N, Daisuke I 2019 *J. Cryst. Growth* **512** 69
- [7] Song K M, Park J 2013 *Semicond. Sci. Technol.* **28** 015010
- [8] Shi Z, Li X, Zhu G Y, Wang Z H, Peter G, Zhu H B, Wang Y J 2014 *Appl. Phys. Express* **7** 082102
- [9] Jia C Y, Zhong C T, Yu T J, Wang Z, Tong Y Z, Guo Y 2012 *Semicond. Sci. Technol.* **27** 065008
- [10] Xu J, Zhang X, Yang H Q, Guo H, Zheng Y Z, Zhou D B, Cui Y P 2014 *Jpn. J. Appl. Phys.* **53** 022101
- [11] Park S H, Moon Y T, Han D S, Park J S, Oh M S, Ahn D 2012 *Semicond. Sci. Technol.* **27** 115003
- [12] Tian W, Zhang J, Wang Z J, Wu F, Li Y, Chen S C, Xu J, Dai J N, Fang Y Y, Wu Z H, Chen C Q 2013 *Light Emitting Diodes* **5** 8200609
- [13] Wang D H, Xu T H, Wang R, Luo S J, Yao T Z 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 050701 (in Chinese) [王党会, 许天早, 王荣, 雒设计, 姚婷珍 2015 物理学报 **64** 050701]
- [14] Yang G F, Zhang Q, Wang J, Gao S M, Zhang R, Zheng Y D 2015 *IEEE Photon. J.* **7** 1
- [15] Park J J, Kang T, Woo D, Son J K, Lee J H, Park B G, Shin H 2011 *18<sup>th</sup> IEEE International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits (IPFA)* Incheon, Korea (South), July 4—7, 2011 p408
- [16] Arslan E, Bütün S, Şafak Y, Uslu H, Taşcıoğlu I, Altındal S, Özbay E 2011 *Microelectron. Reliab.* **51** 370
- [17] Averkiev N S, Chernyakov A E, Levinshtein M E, Petrov P V, Yakimov E B, Shmidt N M, Shabunina E I 2009 *Physica B* **404** 4896
- [18] Bychikhin S, Pogany D, Vandamme L K J, Meneghesso G, Zanoni E 2005 *J. Appl. Phys.* **97** 123714
- [19] Jimenez Tejada J A, Godoy A, Palma A, Lopez Villanueva J A 2002 *J. Appl. Phys.* **92** 320
- [20] Rumyantsev S L, Shur M S, Bilenko Y, Kosterin P V, Salzberg B M 2004 *J. Appl. Phys.* **96** 966

- [21] Boudier D, Cretu B, Simoen E, Veloso A, Collaert N 2018 *Solid State Electron.* **143** 27 p1631
- [22] Simoen E, Ritzenthaler R, Schram T, et al. 2014 *International Conference on Solid-state and Integrated Circuit Technology (ICSICT)* Guilin, China, October 28–31, 2014
- [23] Jessen G H, Fitch R C, Gillespie J K, Via G D, White B D, Bradley S T, Walker Jr D E, Brillson L J 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 485
- [24] Wong H 2003 *Microelectron. Reliab.* **43** 585

# Low-frequency generation-recombination noise behaviors of blue/violet-light-emitting diode

Wang Dang-Hui<sup>†</sup> Xu Tian-Han

(School of Materials Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

( Received 7 February 2019; revised manuscript received 8 April 2019 )

## Abstract

During the past two decades, GaN-based light-emitting diode has been used as a high-quality light-source. Low-frequency noise as a diagnostic tool for quality control and reliability estimation has been widely accepted and used for semiconductor devices. Understanding the origin of efficiency-droop effect is key to developing the ultimate solid-state light source. Various mechanisms that may cause this effect have been suggested, including carriers' escape, losses due to dislocations, and the Auger effect. In this study, we investigate the low-frequency noise behaviors of GaN-based blue light-emitting diode with InGaN/GaN multiple quantum wells. The measured currents range from 0.1 mA to 180 mA. According to the characteristics of power spectral density of current noise and the generation-combination mechanism between electrons and holes in the active region of light-emitting diode (LED), we adopt the well-known model of low-frequency noise to fit the relationship between power spectral density of current and frequency, and find that there exists a transition between generation-combination and  $1/f$  noise when the light-emitting diode begins to work. In other words, it can be derived that the low-frequency noise behaviors are dominated by generation-combination noise when the currents are between 0.1 mA and 27 mA; with the current gradually increasing, the origin source of low-frequency noise in blue/violet-light LED will transit to the  $1/f$  noise. Through the analysis of the transport and recombination mechanism of the carriers, and combination with the model of low-frequency noise, we analyze the corner frequency of the generation-recombination noise. The results of this paper provide an effective tool and method to study the conversion of light-emitting diodes.

**Keywords:** low-frequency noise, light-emitting diode, generation-recombination noise, recombination mechanisms

**PACS:** 81.15.Kk, 78.55.Cr, 71.55.Eq

**DOI:** 10.7498/aps.68.20190189

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [wdhyxp@163.com](mailto:wdhyxp@163.com)