

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

王党会 许天旱 王荣 雒设计 姚婷珍

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

Wang Dang-Hui Xu Tian-Han Wang Rong Luo She-Ji Yao Ting-Zhen

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 050701 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.050701

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.050701>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I5>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

GaN 基发光二极管衬底材料的研究进展

Research progress of substrate materials used for GaN-Based light emitting diodes

物理学报.2014, 63(6): 068103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.068103>

氮化镓基蓝光发光二极管伽马辐照的 $1/f$ 噪声表征

$1/f$ noise characterization gamma irradiation of GaN-based blue light-emitting diode

物理学报.2013, 62(14): 140703 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.140703>

发光二极管用红色荧光粉 $\text{Sr}_{0.8-x}\text{Ba}_x\text{Eu}_{0.2}\text{WO}_4$ 的制备和性质研究

Preparation and luminescent properties of $\text{Sr}_{0.8-x}\text{Ba}_x\text{Eu}_{0.2}\text{WO}_4$ red phosphors for white LED

物理学报.2013, 62(3): 037803 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.037803>

无序光子晶体提高 GaN 基蓝光发光二极管光提取效率的研究

Improvement of light extraction efficiency of GaN-based blue light-emitting diode by disorder photonic crystal

物理学报.2013, 62(1): 017805 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.017805>

基于 LED 光源的非相干宽带腔增强吸收光谱技术探测 HONO 和 NO_2

Incoherent broadband cavity enhanced absorption spectroscopy for measurements of HONO and NO_2 with a LED optical source

物理学报.2012, 61(14): 140703 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.140703>

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*

王党会[†] 许天旱 王荣 雒设计 姚婷珍

(西安石油大学材料科学与工程学院, 西安 710065)

(2014年9月1日收到; 2014年10月14日收到修改稿)

本文对InGaN/GaN多量子阱结构发光二极管开启后的电流噪声进行了测试, 结合低频电流噪声的特点和载流子之间的复合机理, 研究了低频电流噪声功率谱密度与发光二极管发光转变机理之间的关系. 结论表明, 当电流从0.1 mA到10 mA逐渐增大的过程中, InGaN/GaN发光二极管的电流噪声行为从产生-复合噪声逐渐接近于低频 $1/f$ 噪声, 载流子的复合机理从非辐射复合过渡为电子与空穴之间载流子数的辐射复合, 并具有标准 $1/f$ 噪声的趋势, 此时多量子阱中的电子和空穴之间的复合趋向于稳定. 本文的结论提供了一种表征InGaN/GaN多量子阱发光二极管发光机理转变的有效方法, 为进一步研究发光二极管中载流子的复合机理、优化和设计发光二极管、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, 复合机理, 发光效率

PACS: 07.50.Hp, 81.15.Kk, 78.55.Cr, 71.55.Eq

DOI: 10.7498/aps.64.050701

1 引言

近半个世纪以来, 以III族氮化物为基础的半导体材料和器件的研究取得了长足的发展^[1-5], 主要得益于这类材料的二元及其多元合金体系具有良好的光电转化性能, 广泛应用于固体发光(solid-state lighting)、太阳能光伏电池和紫外探测器等方面. 多量子阱结构(multiple quantum well, MQW) InGaN/GaN是固体发光二极管(light-emitting diode, LED)和太阳能光伏发光活性区的最佳选择. 随着GaN基发光二极管功率的增大, 高电流密度注入下, 量子效率降低效应(high-current efficiency droop effect)成为影响其量子效率主要因素. GaN基LED的实质是InGaN/GaN多量子阱结构, 其发光区域主要集中在p-GaN的有源区^[6]. 当对LED施加正向偏置电压时, 注入发光活性区中的少数载流子之间的辐射复合而产生发光现象. 但纤锌矿结构III族氮化物薄膜在异质外

延生长过程中产生的位错密度、点缺陷以及杂质中心等, 实际上形成了深能级缺陷, 具有俘获载流子的作用, 直接影响发光二极管的量子效率. 隧穿电流、产生-复合流(generation-recombination, g-r)、扩散电流等输运过程均会在有源区产生载流子, 这些载流子之间会以辐射复合或者非辐射复合(如俄歇复合等)的方式进行复合. 许多研究者对该类问题进行了深入的研究, 认为俄歇复合、高浓度载流子在有源层的溢出以及c面GaN的极化作用是导致高电流密度下量子效率降低的三个主要因素^[7-9]. 然而, 研究者对有源区载流子俄歇复合的研究, 都是从现象上对其进行描述, 没有从GaN基LED中InGaN/GaN多量子阱结构的深能级缺陷, 通过俘获和发射载流子的作用, 增加了有源区载流子的非辐射复合, 从而影响了发光二极管的量子效率. 目前, 国内外对LED在开启后的复合方式研究的较多, 但对转变机理的表征则很少有研究. 文献^[10]采用界面态陷阱密度和扩散电流的比率, 讨论

* 西安石油大学博士科研启动基金(批准号: Z14086)和陕西省教育厅基金(批准号:2013JK0894)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: wdhyxp@163.com

了GaAs基LED的可靠性和低频噪声之间的关系,分别对LED中的低频 $1/f$ 噪声和g-r噪声进行了分析和表征.文献[11]讨论了GaN基蓝光LED在小电流注入和大电流注入下,空间电荷区与低频噪声之间的 $1/f$ 噪声模型.文献[12]研究了深紫外光量子阱结构LED中的低频电流噪声,并指出在小电流注入和大电流注入时,LED中的载流子复合机理分别为单分子复合(monomolecular recombination)和双分子复合(bimolecular-recombination).这些研究成果,一方面认为在电子流注入下,LED中低频噪声的起源主要是 $1/f$ 噪声和g-r噪声,或者是两者的叠加,但均没有讨论在LED开启后,随着注入电流密度的逐渐增大,发光机理如何进行转变.因此,本文拟建立与俄歇复合直接相关的深能级缺陷与有源区本征载流子相互作用导致载流子涨落的物理模型,将GaN基LED低频电流噪声与载流子复合方式和发光机理相联系,获得GaN基LED器件中两种载流子复合机理之间的相互转化和过渡的条件.

当前,利用LED电流噪声已经作为一种有效的工具,用来研究器件的质量、性能以及可靠性和退化的机理[13-15].在更多的情况下,半导体器件中的低频噪声可以看作是 $1/f$ 噪声和g-r噪声的叠加.它们分别隐含着器件内部的缺陷信息和载流子的涨落与输运信息,但表征的是不同的噪声起源.一般情况下, $1/f$ 噪声水平与材料和器件的整体质量和可靠性密切相关;而g-r噪声的中则包含了局域态中载流子的涨落信息.本文根据低频噪声起源的两种主要机理,在开启后的不同偏置条件下,通过改变电流的大小(从0.1 mA到10 mA),以电流噪声功率谱的特点与电流之间的关系为出发点,研究了LED器件中两种载流子复合机理之间的相互转化和过渡的条件.

2 实验

本文所采用的发光二极管的结构如图1所示,在蓝宝石衬底上先高温生长一层 $2\ \mu\text{m}$ 厚的Si掺杂的n-GaN,然后进行发光活性区InGaN/GaN的5周期多量子阱结构(2.5 nm InGaN/11 nm GaN)的生长,其中In的组分为15.0%(XRD测试的结果).对LED常温下的光致发光谱表明,在波长为420.1 nm/2.95 eV处有一个带边吸收峰,接近紫光范畴;接着继续在多量子阱结构的上面生长一层Mg掺

杂的p-GaN,其厚度为200 nm,最后,做成p型的欧姆接触.LED的低频噪声测试实验中,低频范围为1—10 kHz,电流的范围为0.1—30 mA.为了保证电流值,实验中对LED串联了一个电阻 R_d ,其阻值范围在100—10000 Ω 之间,相应的前置偏压的范围为0.1—5.0 V,因此,可通过改变串联电阻的大小来实现既使LED开启又可以改变通过LED电流的目的.室温下的低频噪声测试是在西安电子科技大学自主开发的“基于虚拟仪器的自动测试系统硬件平台”上完成的,该系统包括器件偏置电路、低噪声前置放大器、数据采集卡和微型计算机四部分.通过改变串联电阻的调节输入电流,经过LAN-12V01低频噪声前置放大器,放大器内部采用并联及多级放大结构,最大限度的降低了放大器自身的电压噪声,同时具有较宽的频率特性.在1 kHz时,电流噪声的测试精度最小达到2.2 pA/Hz,被测器件两端的电噪声进入计算机控制的高速实时采集分析系统.对LED电流涨落噪声的测量是近开启电压附近进行,根据实验测试电路,电流噪声的功率谱密度为

$$S_{\text{LED}} = S_V \frac{(R_{\text{LED}} + R_d)^2}{R_{\text{LED}}^2 R_d^2}. \quad (1)$$

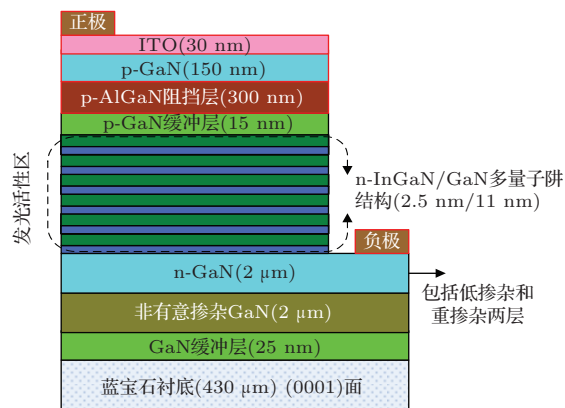


图1 InGaN/GaN MQW LED结构示意图

3 实验结果及讨论

3.1 I - V 特性

对LED进行电参数测试,测得的 I - V 曲线如图2所示.从图2可以得知,当对InGaIn/GaN LED施加约2.80 V的正向偏置时,发光二极管导通.当 $I_f = 20\ \text{mA}$ 时,对应的 $V_f = 3.34\ \text{V}$.在一般情况下,所施加的电压($V \geq 3kT/q$)与通过势垒区与所串

联的电阻之间的关系为 [16]

$$I = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{B0}}{k_B T}\right) \times \exp\left[\left(\frac{q(V - IR_s)}{nk_B T}\right) - 1\right] = I_0 \exp\left[\left(\frac{q(V - IR_s)}{nk_B T}\right) - 1\right], \quad (2)$$

式中, I_0 为反向饱和电流, R_s 为串联电阻, k_B 为玻尔兹曼常数, T 为开氏温度. 根据 (2) 式对 I - V 特性曲线进行拟合, 得到的理想因子 $n = 3.48$. 我们知道, 理想因子的大小可在一定程度上体现 LED 中的寄生电阻、异质结的性质有关, 包括串联电阻和并联电阻的情况, 反映出 LED 的 I - V 特性与完美二极管的差异. 文献 [16] 中的 GaN/InGaN LED, 其理想因子 n 值可达到 6.

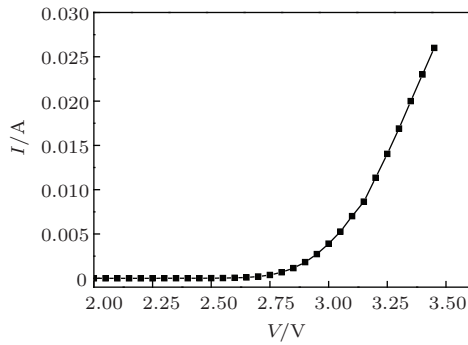


图2 InGaN/GaN LED 的 I - V 曲线

3.2 低频噪声特性

为了进一步的研究 InGaN/GaN MQW LED 的噪声特性, 我们在电流分别为 0.1 mA, 1 mA, 4 mA 和 10 mA 的偏置下对 LED 的电流噪声进行了测量, 测试结果如图 3 和图 4 所示. 从图 3 可以看出, 电流逐渐增大时, 电流噪声功率谱密度也越大; 当电流为 10 mA 时, LED 噪声的行为接近于标准的 $1/f$ 噪声. 文献 [17, 18] 认为, 当电流越小时 (小于 0.1 mA 时), 电流噪声的行为具有接近 g-r 噪声的趋势, 引起这种噪声变化的原因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 [19]. 从图 3 中还可以看到, 当电流为 0.1 mA 时, 电流噪声功率谱具有 g-r 噪声的特征.

从图 4 还可看出, 在电流密度高于 1 mA 时, LED 中只具有低频 $1/f$ 噪声的成分; 而在电流为 0.1 mA 时, 低频噪声中具有一种 g-r 噪声源. 通常

情况下, 电子器件的低频噪声是由三部分构成 [15], 公式为

$$S_{I,\text{noise}}(f) = A + \frac{B}{f^\gamma} + \frac{C}{1 + (2\pi f \tau_0)^2}, \quad (3)$$

式中, A 是白噪声的幅值; f 为频率; B 为 $1/f$ 噪声的幅值; γ 为 $1/f$ 频率因子. 第三项为 g-r 噪声的成分, 其中 C 为 g-r 噪声的幅值; τ_0 为 g-r 噪声的时间常数, $f = 1/(2\pi\tau_0)$. 采用 (3) 式中的前两项对 LED 的电流噪声功率谱密度进行曲线拟合 (拟合范围为 1—10000 Hz) (拟合条件: 当 $\omega\tau \ll 1$ 时, 仅采用 (3) 式中的前两项, 原因在下文 (7) 式中进行解释), 图 5 给出的是对电流为 1 mA 噪声功率谱密度的拟合图, 其他电流噪声功率谱的拟合与图 5 类似. LED 中低频噪声参数的提取结果如表 1 所示.

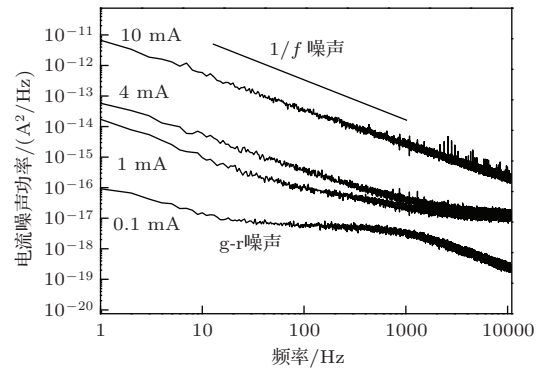


图3 InGaN/GaN LED 的电流噪声与频率的关系图

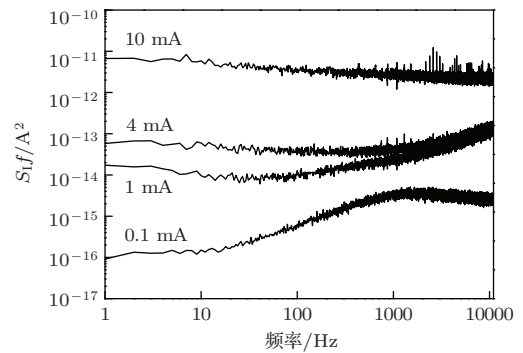


图4 InGaN/GaN LED 的电流噪声乘以频率与频率的关系图

表1 根据 (3) 式中前两项提取出的低频噪声参数

低频噪声参数	电流			
	0.1 mA	1 mA	4 mA	10 mA
A	1.94×10^{-17}	1.84×10^{-17}	1.74×10^{-17}	1.65×10^{-17}
B	2.05×10^{-15}	2.19×10^{-14}	2.28×10^{-13}	2.8×10^{-12}
γ	1.25	1.23	1.18	1.05

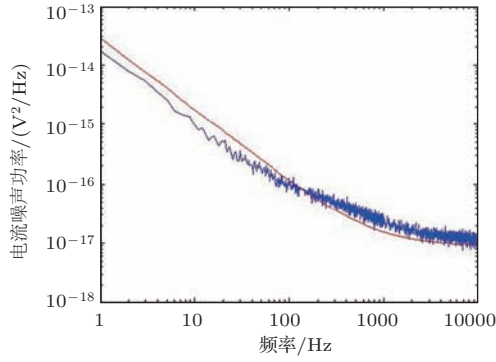


图5 InGaN/GaN LED 的电流噪声功率谱在电流为 1mA 时的曲线拟合图

从表 1 可以看出, 随着电流的增大, 样品中白噪声的幅值 ($A = 4k_B TR$) 变化很小, 这表明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; 但噪声指数因子 γ 值随着测试电流的增大而减小, 并接近于 1. 图 6 (a) 和 (b) 对这两种关系进行了描述.

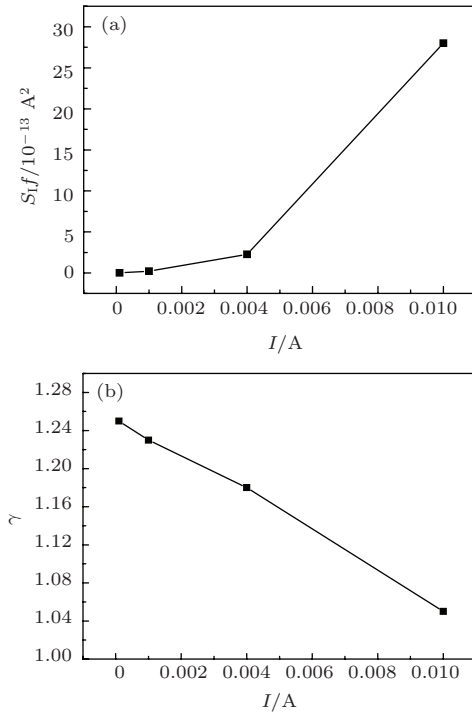


图6 (a) $1/f$ 噪声幅值与电流的关系; (b) $1/f$ 噪声指数因子 γ 与电流的关系

图 6 (a) 中所给出的电流噪声与电流之间的变化趋势与文献 [13] 中的变化趋势接近. 在低电流的偏置下, 当电流从 0.1 mA 逐渐增大到 4 mA 时, 与电流的变化几乎成正比例, 即 $S_I(I) \propto I$ 的这种关系, 可做如下的证明. 根据 $1/f$ 噪声的载流子数模

型 [20], 如下式所示:

$$\frac{S_I}{I^2} = \frac{S_n}{n^2} = \frac{4N_t \tau F(1-F)}{Vn^2 [1 + (\omega\tau)^2]}, \quad (4)$$

其中, N_t 为陷阱中的载流子浓度; n 为量子阱中的电子浓度; τ 为 g-r 噪声中电子与空穴的复合时间; V 为体积; F 为能级占有率. 其表达式为

$$F = \frac{1}{1 + \left(\frac{N_c}{n}\right) e^{-\frac{E_t}{k_B T}}}, \quad (5)$$

其中, N_c 为导带中的有效态密度; E_t 为杂质能级位置.

在低电流的情况下, 电流的表达式为

$$I_{\text{LED}} = \frac{nqV}{\tau_r}. \quad (6)$$

在低电流的情况下, 电子的浓度较小, 杂质能级几乎是空的 ($F \ll 1$), 此时, 在电流噪声在 $\omega\tau \ll 1$ 的情况下, 公式为

$$S_I = \frac{q^2 V^2}{\tau_r^2} S_n = \frac{4N_t q I_{\text{LED}}}{\tau_r \sigma v N_c^2} e^{2E_t/k_B T} \propto I. \quad (7)$$

可以看出, 电流噪声 S_I 随着电流的增大而增大, 在低电流的情况下 (I 从 0.1 mA 到 4 mA), 两者之间近似呈正比例关系, 此时, 引起电流噪声的主要起源是 g-r 噪声 (如图 6 (a) 所示). 当电流从 1 mA 到 10 mA 逐渐增大时, 电流噪声与电流呈二次变化的趋势, 即 $S_I(I) \propto I^2$. 根据 $S_I(f)/I^2 = S_n(f)/n^2 = B/f^\gamma$ ($\gamma = 1.25-1.05$), 可知, 引起电流噪声的主要起源是 $1/f$ 噪声. 从整个电流范围来看, InGaN/GaN MQW LED 内部的低频噪声从电子与空穴之间的非辐射复合而产生的 g-r 噪声, 逐渐过渡为电子与空穴之间由于载流子数的涨落而产生的 $1/f$ 噪声. 对于 InGaN/GaN 异质结而言, 所加偏压 V 与有效势垒高度 ϕ_b^{eff} 的关系为

$$\phi_b^{\text{eff}} = \frac{1}{e} \Delta E_c + \phi_b^{\text{GaN}} - V + \frac{ed_{\text{GaN}}}{\epsilon_{\text{GaN}}} (n_s - N_d d_{\text{InGaN}}), \quad (8)$$

式中, ΔE_c 为导带带阶; d_{GaN} 为 GaN 层的厚度; ϵ_{GaN} 为 GaN 的介电常数; n_s 为载流子浓度; N_d 为背景载流子浓度; d_{InGaN} 为 InGaN 层的厚度. 从 (8) 式可以看出, 当器件上的电压增大时, 量子阱中的外加电场也逐渐增大, 部分地抵消了内建电场对能带结构的影响, 降低了势垒高度, 电子和空穴波函数之间的交叠变得更加容易. 从图 6 (b) 中可以

看出, 噪声频率因子 γ 随着电流的增大而减小并接近于 1, 说明低频噪声的起源发生了改变, 在电流逐渐增大的过程中, 低频噪声逐渐趋近于标准的 $1/f$ 噪声. 从电流范围在 1mA 和 4 mA 之间的低频噪声来分析, 此时 InGaN/GaN MQW LED 内部的载流子的复合机理处于 g-r 噪声和 $1/f$ 噪声的混合态. 从图 4 和图 5 可知, 当电流在这个范围内变化时, 低频噪声的类型从 g-r 噪声过渡为 $1/f$ 噪声. 此时, 非辐射复合过程在 $1/f$ 噪声中占有相对较小的比例. 图 6 (b) 表明随着电流的逐渐增大, 噪声频率因子 γ 的值接近于 1, 说明在电流逐渐增大的过程中, 低频噪声逐渐趋近于标准的 $1/f$ 噪声, 电子和空穴的在发光区域稳定复合, 此时 LED 具有稳定的发光效率.

4 结 论

本文测试了 InGaN/GaN MQW LED 在开启后的不同电流噪声, 根据低频电流噪声的特点, 结合器件中载流子的复合机理, 对低频电流噪声与通过发光二极管电流之间的关系进行了讨论. 结论表明, 在电流从 0.1 mA 到 10 mA 逐渐增大的过程中, InGaN/GaN MQW LED 的电流噪声从低频 g-r 噪声类型逐渐接近于低频 $1/f$ 噪声, 载流子的复合机理从非辐射复合过渡为电子与空穴之间的载流子数的复合, 并具有标准 $1/f$ 噪声的趋势, 多量子阱中的电子和空穴之间的复合趋向于稳定.

参考文献

- [1] Akasaki I, Amano H, Itoh K, Koide N, Manabe K 1992 *Int. Phys. Conf. Ser.* **129** 851
- [2] Amano H, Sawaki N, Akasaki I, Toyoda Y 1986 *Appl. Phys. Lett.* **48** 353
- [3] Nakamura S, Mukai T 1992 *Jpn J. Appl. Phys.* **31** 1457
- [4] Nakamura S, Mukai T, Senoh M 1994 *Appl. Phys. Lett.* **64** 1687
- [5] Nakamura S, Senoh M, Mukai T 1993 *Jpn. J. Appl. Phys.* **32** L8
- [6] Chang M H, Das D, Varde P V, Pecht M 2012 *Microelectron. Reliab.* **52** 5762
- [7] Katsushi Akita, Takashi Kyono, Yusuke Yoshizumi, Hiroyuki Kitabayashi, Koji Katayama 2007 *J. Appl. Phys.* **101** 033104
- [8] Yen-Kuang Kuo, Tsun-Hsin Wang, Jih-Yuan Chang, Miao-Chan Tsai 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 091107
- [9] Cai J X, Sun H Q, Zheng H, Zhang P J, Guo Z Y 2014 *Chin. Phys. B* **23** 058502
- [10] Hu J, Du L, Zhuang Y Q, Bao J I, Zhou J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1384 (in Chinese) [胡瑾, 杜磊, 庄奕琪, 包军林, 周江 2006 物理学报 **55** 1384]
- [11] Liu Y A, Zhuang Y Q, Du L, Su Y H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 140703 (in Chinese) [刘宇安, 庄奕琪, 杜磊, 苏亚慧 2013 物理学报 **62** 140703]
- [12] Sawyer S, Rumyantsev S L, Shur M S, Pala N, Bilenko Yu, Zhang J P, Hu X, Lunev A, Deng J, Gaska R 2006 *J. Appl. Phys.* **100** 034504
- [13] Vilius Palenskis, Jonas Matukas, Sandra Pralgauskaitė 2010 *Solid-State Electronics* **54** 781
- [14] Rumyantsev S L, Wetzel C, Shur M S 2006 *J. Appl. Phys.* **100** 084506
- [15] Jevtić M M 2004 *Microelectron. Reliab.* **44** 1123
- [16] Jiang J P, Sun C C 2010 *Heterojunction Principles and Devices* (Beijing: Publishing House Of Electronics Industry) p216–217 (in Chinese) [江剑平, 孙成城编著 2010 异质结原理与器件 (北京: 电子工业出版社) 第 216—217 页]
- [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: Condensed Matter* **404** 4896
- [18] Bychikhin S, Pogany D, Vandamme L K J, Meneghesso G, Zanoni E 2005 *J. Appl. Phys.* **97** 123714
- [19] Chernyakov A E, Sobolev M M, Ratnikov V V, Shmidt N M, Yakimov E B 2009 *Superlattices Microstructures* **45** 301
- [20] Wong H 2003 *Microelectron. Reliab* **43** 585

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

Wang Dang-Hui[†] Xu Tian-Han Wang Rong Luo She-Ji Yao Ting-Zhen

(School of Materials Science & Engineering of Xi'an ShiYou University, Xi'an 710065, China)

(Received 1 September 2014; revised manuscript received 14 October 2014)

Abstract

In this paper, we measure the emission transition mechanisms in InGaN/GaN multiple quantum well (MQW) light-emitting diodes (LED) using low-frequency current noise from 0.1 to 10 mA. According to the characteristics of the low-frequency current noise and the emission mechanisms of InGaN/GaN LEDs, we study the relationships between low-frequency current noise and current flows through the LEDs. Conclusions indicate that the low-frequency current noise is increased with the increasing current from 0.1 to 10 mA. With a lower current ($I < 1$ mA), it is the generation-recombination noise that dominates in LEDs, and with a higher current ($I > 10$ mA) it is the $1/f$ noise that dominates in LEDs, so there exists an emission transition mechanism in InGaN/GaN MQW LEDs between 0.1 and 10 mA, showing that the mechanism of the carrier recombination changes from non-radiative recombination to a stable fluctuation of carrier numbers. Conclusions of this paper provide an effective method to characterize the emission transition mechanisms, optimize the design of LED so as to improve the quantum efficiency for InGaN/GaN MQW LEDs.

Keywords: low-frequency noise, light-emitting diode, recombination mechanism, emission efficiency

PACS: 07.50.Hp, 81.15.Kk, 78.55.Cr, 71.55.Eq

DOI: [10.7498/aps.64.050701](https://doi.org/10.7498/aps.64.050701)

* Project supported by Youth Science and Technology Innovation Fund of Xi'an Shiyou University (Grant No. Z14086), and the Scientific Research Program Funded by Shaanxi Provincial Education Department (Grant No. 2013JK0894).

[†] Corresponding author. E-mail: wahyxp@163.com