

氮化镓基蓝光发光二极管伽马辐照的  $1/f$  噪声表征\*刘宇安<sup>1)†</sup> 庄奕琪<sup>1)</sup> 杜磊<sup>2)</sup> 苏亚慧<sup>2)</sup>

1) (西安电子科技大学微电子学院, 西安 710071)

2) (西安电子科技大学技术物理学院, 西安 710071)

(2012年11月21日收到; 2013年3月28日收到修改稿)

通过电离辐照对氮化镓基蓝光发光二极管器件有源区光/暗电流产生机制的研究, 建立了电离辐照减小发光二极管有效输出功率电学模型. 通过电离辐照对氮化镓基蓝光发光二极管器件有源区  $1/f$  噪声影响机制的研究, 建立了电离辐照增大发光二极管  $1/f$  噪声的相关性模型. 在  $I < 1 \mu\text{A}$  的小注入区, 空间电荷区的复合电流随辐照剂量的增加而增加. 同时, 随着电离辐照产生缺陷的增加,  $1/f$  噪声幅度增大. 在  $I > 1 \text{mA}$  的大注入条件下, 由于串联电阻的影响占主导地位, 表面复合速率和电流随辐照剂量的增加而增加. 同时, 随着电离辐照产生缺陷的增加,  $1/f$  噪声幅度增大. 根据辐照前后电流电压试验结果噪声测试结论, 证实了实验结论与理论推导结果的一致性. 在  $1 \mu\text{A} < I < 5 \times 10^{-5} \text{A}$  的中值电流情况下, 由于高能载流子散射相关的迁移率涨落与辐照新增缺陷引起的载流子数涨落竞争机制, 随着辐照剂量增大,  $1/f$  噪声在频域变化没有明显规律. 但是, 通过  $1/f$  噪声时域多尺度熵复杂度分析方法, 得出随着辐照剂量增大,  $1/f$  噪声时域多尺度熵复杂度的结果. 最终证实  $1/f$  噪声幅度可以敏感地反映小注入和大注入情况下氮化镓基蓝光发光二极管电离辐照的可靠性. 噪声幅值越大, 则说明辐照感应  $N_{\text{it}}$  越高, 暗电流相关的复合电流越大, 光电流相关的扩散电流比例减少, 使得器件发光效率、光输出功率等性能参数下降, 继而影响器件可靠性, 造成失效率显著增大.  $1/f$  噪声时域多尺度熵复杂度可以敏感地反映中值电流情况下氮化镓基蓝光发光二极管的电离辐照可靠性. 多尺度熵复杂度越大, 则说明辐照感应越多, 复合电流越大, 器件可靠性越差. 本文结论提供了一种基于  $1/f$  噪声的氮化镓基蓝光发光二极管电离辐照可靠性表征方法.

关键词:  $1/f$  噪声, 电离辐照, 氮化镓基蓝光发光二极管

PACS: 07.50.Hp, 42.88.+h, 71.55.Eq

DOI: 10.7498/aps.62.140703

## 1 引言

近年来随着航天技术和电子技术的进一步发展, GaN 基发光二极管 (LED) 越来越多地用在卫星通信系统的天气预报和宽带数据传输中, 也常作为光源器件以及光电耦合器的前端被广泛应用于军事及航天领域<sup>[1,2]</sup>. 器件在太空中工作, 不可避免地受到太空中各种射线的照射, 从而使其性能发生衰减, 所以在此条件下工作的器件稳定性一直倍受重视. 研究各类辐射对 GaN 基发光二极管的影响, 不仅对器件的实际应用具有重要意义, 而且有助于了解氮化镓材料和器件在特殊环境下的物理特性. 目前国内外对 GaN 基蓝光 LED 的辐照效应研究大都

集中在高能电子和质子<sup>[2-5]</sup>, 但作为空间中存在的重要辐射源伽马 ( $\gamma$ ) 射线对其影响的报道<sup>[6,7]</sup> 却很少. 而将低频噪声用 GaN 基蓝光 LED 的  $\gamma$  辐照效应研究处于起步阶段. 本文试图通过研究电离辐照对器件电参数和噪声参数的影响, 建立基于  $1/f$  噪声的氮化镓基蓝光 LED 电离辐照可靠性模型. 根据试验结果找到表征氮化镓基蓝光 LED 电离辐照退化的敏感参量. 本文结论将提供一种基于  $1/f$  噪声的氮化镓基蓝光 LED 电离辐照可靠性表征方法.

2  $\gamma$  辐照对 LED 的影响

$\gamma$  射线与物质相互作用后会康普顿散射, 打出康普顿电子, 高能电子继续与原子相互作用,

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61076101) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: danu0012004@163.com

会在材料中引入晶格损伤或形成各种缺陷,产生电离效应和位移效应<sup>[8]</sup>. 对于宽带隙的 GaN 基材料及器件来说,在 2 Mrad 总辐照剂量条件下,主要体现为电离效应,不会产生明显的位移效应<sup>[9]</sup>.

## 2.1 电离辐照减小 LED 有效输出功率

氮化镓基蓝光 LED 的实质是半导体 PN 结,其发光区域主要集中在 p-GaN 有源区<sup>[10]</sup>.  $\gamma$  射线与其作用产生的电离辐照效应将在 LED 有源区中引入空间电荷和新的界面态陷阱  $N_{it}$ , 这些缺陷俘获载流子,产生非辐射复合,增大暗电流,减少 LED 的内量子效率,从而降低 LED 的有效输出功率  $P_{out}$ .

首先讨论与辐照缺陷密切相关的非辐射复合,其主要是通过复合中心的载流子复合禁带中能级为  $E_t$  的复合中心俘获非平衡载流子,转化为声子,发生光淬灭,产生暗电流. 非辐射复合还包含俄歇复合. 氮化镓基蓝光 LED 为宽带隙半导体材料,俄歇复合可以忽略. 设通过复合中心的净复合率为<sup>[11]</sup>

$$R_n = \frac{C_n C_p N_t (N_0 + P_0 + n)n}{C_n (N_0 + n_1 + n) + C_p (P_0 + p_1 + p)}, \quad (1)$$

其中  $n_1 = n_i \exp\left(\frac{E_t - E_i}{kT}\right)$ ,  $p_1 = n_i \exp\left(\frac{E_i - E_t}{kT}\right)$ ,  $C_n$ ,  $C_p$  分别为电子和空穴俘获系数,  $N_t$  为界面态陷阱密度,  $N_t = N_{pt} + N_{it}$ , 即包括  $N_{pt}$  器件工艺缺陷和  $N_{it}$  电离辐照产生缺陷,  $E_t$  为复合中心能级,  $E_i$  为本征费米能级,  $n_i$  为本征载流子浓度.

在 LED 中与缺陷没有直接关系的辐射复合指的就是直接辐射复合(又称带间辐射复合)是导带电子与价带空穴直接产生复合,产生扩散电流(光电流),或者说发射光子的过程. 这种复合的净复合率  $R_r$  可由下式表示<sup>[11]</sup>:

$$R_r = B_r (N_0 + P_0 + n)n, \quad (2)$$

$R_r$  为直接辐射复合的净复合率,  $B_r$  为复合系数,  $N_0$ ,  $P_0$  分别为平衡态电子和空穴密度,  $n$  为有源区非平衡载流子密度.

有源区过剩载流子密度和总光子密度的速率方程为

$$\frac{dn}{dt} = \frac{I_{LED}}{qV_{act}} - R_n(n) - R_r(n), \quad (3)$$

$$\frac{ds}{dt} = \beta_{sp} R_r(n) - \frac{s}{\tau_{ph}}, \quad (4)$$

其中,  $V_{act}$  为有源区体积,  $I_{LED}$  为注入到有源区的电流,  $s$  为有源区总光子密度,  $\beta_{sp}$  为自发发射系数,

$\tau_{ph}$  为光子寿命,  $L_n$  为电子扩散长度,  $D_n$  为电子扩散系数,  $N_A$  为受主浓度,  $d$  为有源层厚度,  $A$  为有源层有效面积,  $h\nu$  为每个光子的能量,  $\eta$  为光学效率,  $c$  为光速.

在稳态条件下,由(3),(4)两式可得:

$$I_{LED} = R_n(n)qV_{act} + R_r(n)qV_{act}, \quad (5)$$

其中,第一项为与缺陷密切相关的暗电流,第二项为与缺陷没有直接关系的光电流. 假设  $C_n = C_p = C$ , 且  $N_0 + n = P_0 + p$ , 将有源区总光子密度  $s = \tau_{ph}\beta_{sp}R_r(n)$  代入(1),(2)两式可得 LED 注入效率  $\eta_0$ :

$$\begin{aligned} \eta_0 &= \frac{R_r(n)}{R_n(n) + R_r(n)} \\ &= \frac{2B_r n_i \exp\left(\frac{qV}{2k_0T}\right)}{CN_t + 2B_r n_i \exp\left(\frac{qV}{2k_0T}\right)}. \end{aligned} \quad (6)$$

将(6)式代入(5)式可得:

$$R_r(n) = \frac{2B_r n_i \exp\left(\frac{qV}{2k_0T}\right)}{CN_{LED} + 2B_r n_i \exp\left(\frac{qV}{2k_0T}\right)} \cdot I_{LED}. \quad (7)$$

根据半导体 PN 结  $I$ - $V$  特性<sup>[11]</sup>, 结合对 LED 分析得到的(5),(7)两式,可推知 LED 的  $I$ - $V$  特性为

$$\begin{aligned} I_{LED} &= \frac{D_n n_i^2 q}{L_n N_A} \exp(qV/kT) \\ &+ \frac{qn_i d CN_t}{2} \exp(qV/2kT), \end{aligned} \quad (8)$$

其中,  $N_t$  包括  $N_{pt}$  器件工艺缺陷和  $N_{it}$  电离辐照产生缺陷. 由于器件发光主要来自于扩散电流,而非辐射复合主要来自于复合电流,则根据(6)和(8)式可得光/暗电流比:

$$\begin{aligned} \frac{R_r(n)}{R_n(n)} &= \frac{2B_r n_i \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right)}{CN_t} \equiv \frac{I_D}{I_R} \\ &= \frac{2n_i D_n}{L_n N_A d CN_t} \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right). \end{aligned} \quad (9)$$

将(9)式化简,结合(6)和(8)式依次代入有效光功率  $P_{out}$  的表达式,则可得到输出有效光功率  $P_{out}$  为

$$\begin{aligned} P_{out} &= \eta A c h \nu \tau_{ph} \beta_{sp} R_r(n) \\ &= \eta A c h \nu \tau_{ph} \beta_{sp} \frac{D_n n_i^2 q \cdot 2B_r n_i \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right)}{L_n N_A CN_t}, \end{aligned} \quad (10)$$

可见,随着辐照剂量增加,电离辐照产生缺陷  $N_{it}$  的增加,工艺缺陷  $N_{pt}$  不变,会使(10)式中的  $P_{out}$  减小.

## 2.2 电离辐照增大 LED 1/f 噪声

根据 van der Ziel 和 Harder 等的低频噪声理论, 低频噪声主要分为: 由于器件迁移率涨落造成少子扩散电流涨落引起的基本 1/f 噪声, 由于表面氧化层、空间电荷区、界面态等处的陷阱中心对载流子的随机俘获与发射引起的非基本 1/f 噪声<sup>[12]</sup>.  $\gamma$  射线辐照使 GaN 基发光二极管产生电离效应, 打出的康普顿电子与原子相互作用, 会在材料中引入晶格损伤或形成各种缺陷, 尤其是在空间电荷区的缺陷会对 GaN 基发光二极管引入非基本 1/f 噪声.

根据迁移率涨落机制<sup>[12]</sup>, 与缺陷没有直接关系的扩散 1/f 噪声功率谱密度与输入电流有如下关系:

$$S_{I_D}(f) = \frac{\alpha q I_D}{f \tau}, \quad (11)$$

其中,  $S_{I_D}(f)$  为扩散 1/f 噪声功率谱,  $I_D$  为扩散电流,  $\alpha$  为 Hooge 常数,  $q$  为电子电量,  $\tau$  为少子寿命,  $f$  为频率.

根据半导体理论<sup>[13]</sup> 和载流子数涨落理论<sup>[14]</sup>, 与缺陷密切相关的复合速率  $G_R$  涨落功率谱  $S_{G_R}(f)$  及复合电流  $I_R$  功率谱  $S_{I_R}(f)$  可分别表示为

$$S_{G_R}(f) = B \cdot \frac{kTN_t}{\ln(\tau_2/\tau_1)} \cdot \frac{1}{f}, \quad (12)$$

$$S_{I_R}(f) = (qn_1A)^2 B \cdot \frac{kTN_t}{\ln(\tau_2/\tau_1)} \cdot \frac{1}{f} \left( \frac{I_R}{I_0} \right)^{\frac{2\beta V_a}{V}}, \quad (13)$$

其中对称结的表面分量有, 界面复合电流理想因子  $\beta = 2$ ,  $B$  为常数, 其中  $N_t$  包括  $N_{pt}$  器件工艺缺陷和  $N_{it}$  电离辐照产生缺陷. 故 (13) 式可化简为

$$S_{I_R}(f) = \left( \frac{qn_1A}{I_0} \right)^2 \cdot B \cdot \frac{kTN_t}{\ln(\tau_2/\tau_1)} \cdot \frac{1}{f} \cdot I_R^2. \quad (14)$$

当复合速率很慢, 可以认为低频 1/f 噪声主要由扩散和复合电流噪声两部分组成, 则电流 1/f 噪声可表示为

$$S_I(f) = \frac{\alpha q I_D}{f \tau} + B \cdot \frac{kTN_t}{\ln(\tau_2/\tau_1)} \cdot \frac{1}{f}. \quad (15)$$

当复合速率很快, 则低频 1/f 噪声主要由复合速率涨落以及扩散和复合电流噪声三部分组成, 则电流 1/f 噪声可表示为

$$S_I(f) = \frac{\alpha q I_D}{f \tau} + \left[ \left( \frac{qn_1A}{I_0} \right)^2 \cdot I_R^2 + 1 \right] \cdot B \times \frac{kTN_t}{\ln(\tau_2/\tau_1)} \cdot \frac{1}{f}. \quad (16)$$

可见, 随着辐照剂量增加, 电离辐照产生缺陷  $N_{it}$  的增加, 工艺缺陷  $N_{pt}$  不变, 会导致 (16) 式中  $N_t$

的增加, 对公式第一项的基本 1/f 噪声没有影响, 引起公式第二项的非基本 1/f 噪声增大, 从而使总电流 1/f 噪声  $S_I(f)$  增大.

## 3 实验

实验样品是国产 GaN 基蓝光发光二极管. 采用金属氧化物化学气相沉积在蓝宝石 ( $Al_2O_3$ ) 衬底上生长外延材料, 从下至上依次为低温生长的 GaN 缓冲层, 接着是 n-GaN 层、n-AlGaIn 层和 InGaIn 量子阱有源区, 上边是掺 Mg 的 p-AlGaIn 层和 p-GaN 层. 生长好的 LED 外延片首先在  $N_2$  环境下高温退火 10—40 min, 达到 Mg 激活的作用. 然后采用光刻胶保护, 用感应耦合等离子刻蚀技术 (ICP) 刻蚀出台阶图形, 以便制作上下电极, 之后将 p 电极与 n 电极金属淀积在上下台面上, p 电极的材料是 Ni/Au, n 电极的材料是 Ti/Al/Ti/Au, 然后在 p-n 结附近生长一层  $SiO_2$  作为保护, 最后通过磨片、划片、裂片, 将管芯压焊制作成器件并进行测试, 本次辐照实验是在西北核技术研究所进行的, 使用  $^{60}Co$  作为  $\gamma$  射线的产生源.  $\gamma$  辐照的累计总剂量分别为 30 krad ( $SiO_2$ ), 60 krad ( $SiO_2$ ), 200 krad ( $SiO_2$ ), 500 krad ( $SiO_2$ ), 1000 krad ( $SiO_2$ ), 2500 krad ( $SiO_2$ ). 为减少退火效应, 故辐照完成后, 必须在 12 h 内对其电学特性和噪声特性进行测试. 器件的伏安特性和低频噪声测试采用本实验室自主开发的“基于虚拟仪器的自动测试系统硬件平台”上完成的, 其中包括器件偏置电路、低噪声前置放大器、数据采集卡和微型计算机四部分.

## 4 电离辐照引起 LED 电流退化

GaN 基蓝光 LED 辐照前后的正向  $I-V$  曲线如图 1 所示. 从图中可以看出 GaN 基蓝光 LED 的三段  $I-V$  曲线在辐照前后的变化是不同的.

I: 在  $I < 1 \mu A$  的小注入区, 由于 GaN 外延层中存在较高的位错密度以及由于 InGaIn/GaN MQW(多量子) 阱区存在强烈的压电极化和自发极化效应, 载流子的输运方式主要为隧穿, 电流主要为空间电荷区的隧道电流和复合电流, 复合电流占主要地位, 随辐照剂量的增加正向电流明显增加.

II: 在中值电流区, 有源区载流子主要发生的是辐射复合, GaN 基蓝光 LED 的电流以扩散电流为主, 随辐照剂量的增加正向电流略微增加.

III: 在  $I > 1 \text{ mA}$  时, 大注入条件下, 串联电阻 (来源于体电阻和接触电阻) 的影响占据主导地位, 复合电流占据主导地位. 随辐照剂量的增加正向电流变化不明显.

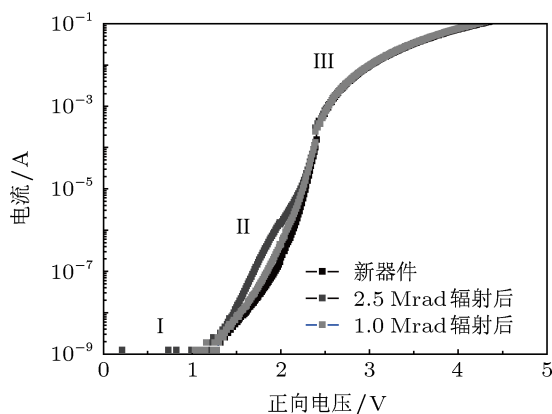


图1 GaN 基蓝光二极管辐照前后的正向  $I$ - $V$  曲线

### 5 电离辐照与 $1/f$ 噪声退化相关性

根据 2.1 和 2.2 节的理论推导可以得出, 电离辐照产生缺陷  $N_{it}$ , 减小 LED 的有效输出光功率, 两者负关联. 电离辐照产生缺陷  $N_{it}$ , 增大总电流  $1/f$  噪声  $S_I(f)$ , 两者正关联. 因此, 可以用噪声表征电离辐照引起的 LED 有效输出光功率退化即 LED 电离辐照退化. 载流子的不同输运方式对应了器件不同的低频噪声产生机制. 电离辐照对不同机制产生的低频噪声其影响也不一样. 对 GaN 基蓝光 LED 来说, 从图 1 可知, 其  $I$ - $V$  特性分为明显的三段, 对应载流子不同的输运方式, 从而有不同的低频噪声产生机制. 接下来, 分别讨论电离辐照对它们的影响.

#### 5.1 小注入

在小注入时, 如图 1 中 I 段所示,  $I < 1 \mu\text{A}$  时, 这时器件的全部电阻主要由势垒电阻构成, 其低频噪声主要来源于空间电荷区禁带中部附近的深能级产生——复合中心和陷阱中心. 其噪声表达式为 (14) 式. 根据 2.2 节的推导可知, 小注入情况下, 电离辐照产生缺陷  $N_{it}$ , 增大复合电流, 增大非基本  $1/f$  噪声. 因此, 随着辐照剂量增大,  $1/f$  噪声增大. 实验结果如图 2 所示.

从图 2 可以看出, 电流为  $5 \times 10^{-7} \text{ A}$  的小注入, 新器件噪声幅值为  $5.80706 \times 10^{-13} \text{ A}^2/\text{Hz}$ , 经过总辐照剂量  $1 \text{ Mrad}$  辐照后器件噪声幅值增大为

$1.80423 \times 10^{-12} \text{ A}^2/\text{Hz}$ , 经过总辐照剂量  $2.5 \text{ Mrad}$  辐照后器件噪声幅值又增大为  $6.17376 \times 10^{-12} \text{ A}^2/\text{Hz}$ . 这个结果表明, 小注入区,  $1/f$  噪声幅值随着辐照剂量增大, 与理论预测完全一致.

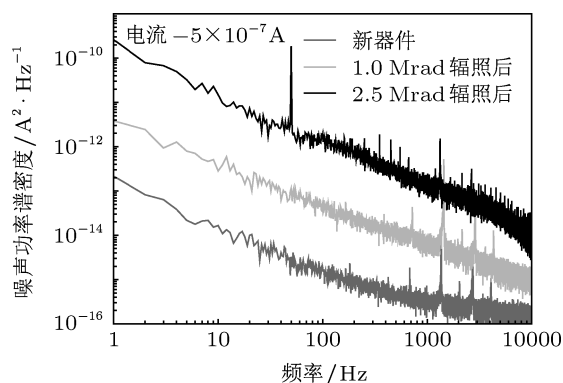


图2 GaN 基蓝光二极管小注入区辐照前后的  $1/f$  噪声

#### 5.2 中值电流

随着电流的增长, 如图 1 中的 II 段所示, 当  $1 \mu\text{A} < I < 5 \times 10^{-5} \text{ A}$ , 载流子主要以扩散的方式进入到量子阱区发生直接复合, 其  $1/f$  噪声为 (15) 式, 根据 2.2 节的推导可知, 中值电流情况下, 以扩散电流为主. 辐照后, 高能载流子改变了有源区散射, 改变了迁移率相关的扩散电流噪声. 辐照感应缺陷  $N_{it}$  增强了载流子数涨落相关复合电流噪声. 因此, 随着辐照剂量增大, 总的  $1/f$  噪声在频域变化有可能增大也可能减小. 实验结果如图 3 所示.

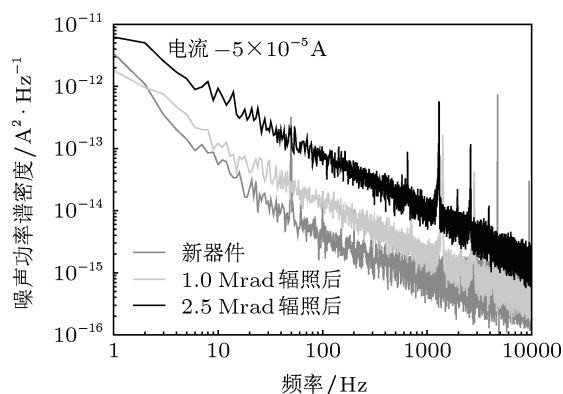


图3 GaN 基蓝光二极管中值电流区辐照前后的  $1/f$  噪声

从图 3 可以看出, 电流为  $5 \times 10^{-5} \text{ A}$  的中值电流区, 新器件噪声幅值为  $3.42834 \times 10^{-12} \text{ A}^2/\text{Hz}$ , 经过总辐照剂量  $1 \text{ Mrad}$  辐照后器件噪声幅值减小为  $1.82568 \times 10^{-12} \text{ A}^2/\text{Hz}$ , 经过总辐照剂量  $2.5 \text{ Mrad}$  辐照后器件噪声幅值增大为  $6.24206 \times$

$10^{-12} \text{ A}^2/\text{Hz}$ . 这个结果表明, 中值电流区, 随着辐照剂量增大, 总的  $1/f$  噪声在频域变化先减小后增大, 没有一致性. 因此, 针对在频域没有明显规律的中值电流辐照前后  $1/f$  噪声, 采用  $1/f$  噪声时域多尺度熵复杂度分析方法, 该方法可用于描述时间序列在不同时间尺度上的不规则程度 [15]. 本文将多尺度熵方法用于 GaN 基蓝光二极管中值电流区辐照前后的  $1/f$  噪声数据分析.

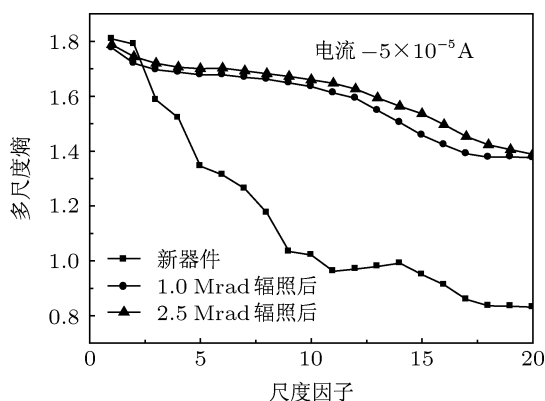


图4 GaN 基蓝光二极管中值电流区辐照前后的  $1/f$  噪声多尺度熵复杂度

从图4可以看出, 当尺度大于4时, 新器件多尺度熵复杂度最小, 经过总辐照剂量 1 Mrad 辐照后器件多尺度熵复杂度增大, 经过总辐照剂量 2.5 Mrad 辐照后器件多尺度熵复杂度最大. 这个结果表明中值电流区, 随着辐照剂量增大,  $1/f$  噪声时域多尺度熵复杂度增大. 新器件的噪声信号规律性较强, 是因为其电流噪声机制源于扩散电流. 辐照后, 高能载流子增强了有源区散射, 使迁移率改变, 增大了迁移率相关的扩散电流噪声, 辐照感应缺陷  $N_{it}$  的增加, 增强了载流子数涨落, 噪声信号较不规律, 其复杂度较大. 因此, 多尺度熵能反映中值电流区电流噪声信号复杂度及有源区电流混乱度的变化.

### 5.3 大注入

随着电流的进一步增加, 串联电阻上的压降将不可忽略, 电流随着电压的增长已不再呈指数的关系增长, 如图1中的 III 段所示. GaN 基 LED 的串联电阻和器件的 p-GaN 层密切联系 [16], 由于结附近两种材料晶格常数失配使得在界面处存在大量的悬挂键和弱键. 在大电流和电离辐照效应的双重作用下, 这些悬挂键可以失去一个未成对电子或获得一个配位电子而形成界面态, 弱键也会断裂形成

新的界面态, 结区表面原有的一些悬挂键和弱键也会以相同的方式形成新的表面态. 此时的  $1/f$  噪声来源于串联电阻. 根据 2.2 节的推导可知, 与缺陷密切相关的复合速率  $G_R$  涨落功率谱  $S_{G_R}(f)$  及复合电流  $I_R$  功率谱  $S_{I_R}(f)$  可分别由 (12) 和 (13) 式表示. 总的电流噪声为 (16) 式的第二项非基本  $1/f$  噪声.

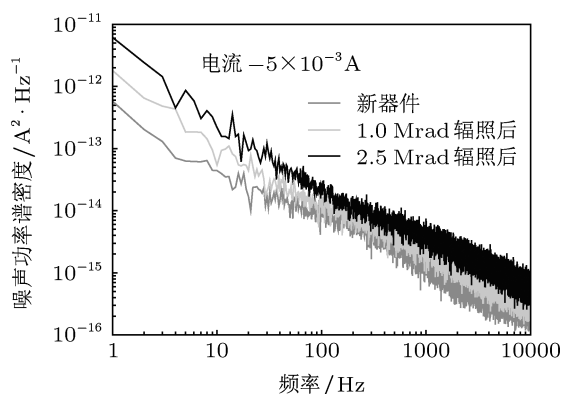


图5 GaN 基蓝光二极管大注入区辐照前后的  $1/f$  噪声

从图5可以看出, 电流为  $5 \times 10^{-3} \text{ A}$  的大注入区, 新器件噪声幅值为  $2.14661 \times 10^{-13} \text{ A}^2/\text{Hz}$ , 经过总辐照剂量 1 Mrad 辐照后器件噪声幅值增大为  $3.80733 \times 10^{-12} \text{ A}^2/\text{Hz}$ , 经过总辐照剂量 2.5 Mrad 辐照后器件噪声幅值又增大为  $2.57861 \times 10^{-10} \text{ A}^2/\text{Hz}$ . 这个结果表明, 大注入区,  $1/f$  噪声幅值随着辐照剂量增大, 与理论预测完全一致.

综合上述, 来源于扩散电流的  $1/f$  噪声组分随辐照剂量增大变化不明显, 辐照前后器件的噪声幅值没有发生明显的变化. 而来源于复合电流  $1/f$  噪声组分随辐照剂量的增加有一个较大的增长幅度. 因此  $1/f$  噪声退化可以敏感地表征以复合电流  $1/f$  噪声为主的小注入和大注入区电离辐照退化, 噪声幅值越大, 则说明  $N_{it}$  越高, 暗电流相关的复合电流越大, 光电流相关的扩散电流比例减少, 使得器件发光效率、光输出功率等性能参数下降, 造成失效率显著增大. 对中值电流区,  $1/f$  噪声时域多尺度熵复杂度可以更敏感地反映氮化镓基蓝光 LED 的可靠性. 多尺度熵复杂度越大, 则说明除了有高能载流子对迁移率相关的扩散电流的影响, 还有辐照感应缺陷  $N_{it}$  对复合电流的影响, 噪声信号越不规律, 器件可靠性越差.

## 6 结论

本文通过电离辐照对氮化镓基蓝光 LED 器件

有源区光/暗电流产生机制的研究,建立了电离辐照减小 LED 有效输出功率的电学模型. 通过电离辐照对氮化镓基蓝光 LED 器件有源区  $1/f$  噪声影响机制的研究,建立了电离辐照增大 LED  $1/f$  噪声的相关性模型. 根据辐照前后电流电压试验结果噪声测试结论,证实了实验结论与理论推导结果的一致性. 在  $I < 1 \mu\text{A}$  的小注入区,随着电离辐照产生缺陷  $N_{it}$  的增加,  $1/f$  噪声幅度增大. 在  $I > 1 \text{mA}$  的大注入条件下,随着电离辐照产生缺陷  $N_{it}$  的增加,  $1/f$  噪声幅度增大.  $1/f$  噪声退化可以敏感地表征以复合电流  $1/f$  噪声为主的小注入和大注入区电

离辐照退化,噪声幅值越大,则说明  $N_{it}$  越高,暗电流相关的复合电流越大,光电流相关的扩散电流比例减少,使得器件发光效率、光输出功率等性能参数下降,造成失效率显著增大. 对中值电流区,  $1/f$  噪声时域多尺度熵复杂度可以更敏感地反映氮化镓基蓝光 LED 的可靠性. 多尺度熵复杂度越大,则说明除了有高能载流子对迁移率相关的扩散电流的影响,还有辐照感应缺陷  $N_{it}$  对复合电流的影响,噪声信号越不规律,器件可靠性越差. 本文结论提供了一种基于  $1/f$  噪声的氮化镓基蓝光 LED 电离辐照可靠性表征方法.

- [1] Rohit K, Sang Y H, Pearton S J 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 212107
- [2] Rohit K, Allums K K, Abernathy C R, Pearton S J 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 3131
- [3] Gaudreau F, Carlone C, Houdayer A, Khanna S M 2001 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **48** 1778
- [4] Lia C S, Subramanian S 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 1998
- [5] Khanna S M, Estan D, Houdayer A, Liu H C, Dudek R 2004 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **51** 3585
- [6] Sawyer S, Rumyantsev S L, Shur M S 2006 *J. Appl. Phys.* **100** 034504
- [7] Rumyantsev S L, Wetzel C, Shur M S 2006 *J. Appl. Phys.* **100** 084506
- [8] Chen P X 2005 *Radiation Effects on Semiconductor Devices and Integrated Circuits* (Beijing: National Defense Industry Press) p20 (in Chinese) [陈盘训 2005 半导体器件和集成电路的辐射效应 (北京: 国防工业出版社) 第 20 页]
- [9] Khanna S M, Webb J, Tang H, Houdayer A J, Carlone C 2000 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **47** 2322
- [10] Chang M H, Das D, Varde P V, Pecht M 2012 *Microelectron. Reliab.* **52** 5762
- [11] Hu J, Du L, Zhuang Y Q 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1384 (in Chinese) [胡瑾, 杜磊, 庄奕琪 2006 物理学报 **55** 1384]
- [12] Jevtic M M 1995 *Microelectron. Reliab.* **35** 1925
- [13] Kirton M J, Uren M J 1989 *Adv. Phys.* **38** 367
- [14] Jiang S X, Abbott D, Dai Y S 2000 *Microelectron. Reliab.* **40** 171
- [15] He L, Du L, Zhuang Y Q 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6545 (in Chinese) [何亮, 杜磊, 庄奕琪 2008 物理学报 **57** 6545]

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

Liu Yu-An<sup>1)†</sup> Zhuang Yi-Qi<sup>1)</sup> Du Lei<sup>2)</sup> Su Ya-Hui<sup>2)</sup>

1) (School of Microelectronics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

2) (School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(Received 21 November 2012; revised manuscript received 28 March 2013)

## Abstract

The electrical model that ionizing radiation reduces the effective power output of GaN-based blue light-emitting diode is proposed by investigating the light/dark current generation mechanism in active region of GaN-based blue light emitting diode device under ionizing irradiation. The model that the ionizing radiation increases the  $1/f$  noise of GaN-based blue light-emitting diode device is proposed by studying the  $1/f$  noise mechanism of the active region of GaN-based blue light-emitting diode device under exposure to ionizing radiation. In the small injection region ( $I < 1 \mu\text{A}$ ), the space charge region and the recombination current increase with irradiation dose increasing. Meanwhile, with the increase of the ionizing-irradiation-generated defects, the  $1/f$  noise amplitude increases. In the large injection region ( $I > 1 \text{mA}$ ), due to the dominant influence of the series resistance, the surface recombination velocity and current increases with irradiation dose increasing. Meanwhile, with the increase of ionizing-irradiation-generated defects, the  $1/f$  noise amplitude increases. The  $I$ - $V$  and  $1/f$  noise test results before and after irradiation are in good agreement with theoretical results. In the middle injection region ( $1 \mu\text{A} < I < 5 \times 10^{-5} \text{A}$ ), due to the competition between mobility fluctuation caused by energetic carrier scattering and the carrier number fluctuation caused by the newly irradiation-generated defects, as the radiation dose increases,  $1/f$  noise has no significant changes in the frequency domain. However, through the  $1/f$  noise time domain multiscale entropy complexity analysis, a conclusion can be drawn that with the increase of radiation dose, the  $1/f$  noise domain multi-scale entropy becomes more complex.  $1/f$  noise amplitude ultimately proves to be sensitive to reflect the reliability of GaN-based blue light-emitting diode ionizing irradiation in the case of small injection and large injection. The greater the noise amplitude, the higher the irradiation induction trap is, and the greater the generation-recombination current related to the dark current, the smaller the photocurrent related to the diffusion current is, so that the luminous efficiency of the device, the optical output power, and other performance parameters decrease, thus affecting the reliability of the device and resulting in the more failure devices.  $1/f$  noise time domain multiscale entropy complexity can reflect ionizing irradiation reliability of GaN-based blue light emitting diodes sensitively in the middle injection region. The more the multiscale entropy complexity, the bigger the irradiation induction generation-recombination current is, and the worse the reliability of the device is. The present study provides a method of characterizing the GaN-based blue light-emitting diode ionizing irradiation reliability according to  $1/f$  noise.

**Keywords:**  $1/f$  noise, ionizing radiation, GaN-based blue light emitting diode

**PACS:** 07.50.Hp, 42.88.+h, 71.55.Eq

**DOI:** 10.7498/aps.62.140703

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61076101).

† Corresponding author. E-mail: danu0012004@163.com