

GaN 基多量子阱蓝光 LED 的 γ 辐照效应^{*}

金豫浙 胡益培 曾祥华[†] 杨义军

(扬州大学物理科学与技术学院, 扬州 225002)

(2009 年 5 月 4 日收到; 2009 年 6 月 26 日收到修改稿)

本文用 4×10^4 Ci ($1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$) 的 ^{60}Co 源 (剂量率 $2 \times 10^5 \text{ rad(Si)/h}$) 对 GaN 基 InGaN/GaN 多量子阱蓝光 LED 进行 5 种剂量的 γ 射线的辐照实验. 通过辐照前后蓝光 LED 的波长、色纯度、最大半峰宽 (FWHM) 和电流-电压 (I - V)、电流-光通量 (I - F) 等电光学特性分析, 得到 γ 射线对 GaN 基 LED 器件的辐照效应. 结果发现, 辐照后 LED 器件的发光一致性和均匀性变差, 在 20 mA 工作电流下, 最大剂量下器件发光强度衰减近 90%, 光通量衰减约 40%, 并得到器件的抗辐照能力的参数 $\tau_0 K_\gamma$ 为 $4.039 \times 10^{-7} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$, 发现较低的正向偏压下 (小于 2.6 V) 器件的饱和电流随辐照总剂量增大而增大.

关键词: GaN, 发光二极管, γ 辐照, 辐照效应

PACC: 7280E, 7865K, 6180E, 7340L

1. 引言

GaN 作为宽带隙第三代半导体材料的代表, 是制造光电子器件、高频大功率器件等的理想材料, 材料本身也有优良的抗辐照性能^[1]. 而在卫星、航天飞船、导弹等军事和太空领域中, LED 器件作为光源的应用也备受瞩目; 器件工作在这些强辐射场环境中, 研究发光二极管器件的光电可靠性有着重要的意义^[1-6]. 近几年, 半导体器件已开始在空中应用领域拓展, 如已报道的 GaN 基肖特基二极管 (SBD) 的 γ 辐照效应^[3-5], 提到在 γ 射线照射过的器件中产生的次级电子会对材料造成晶格损伤, 引入新的载流子陷阱和复合中心会影响其肖特基势垒高度和界面态的密度分布; Li 等^[6]报道了中子对 GaN 基双异质结型发光二极管的辐照效应, 文中提到辐照处理后的器件被引入如结区陷阱、界面态、晶格位错等, 对发光二极管器件的光输出和器件的电学可靠性的变化造成影响, 并指出辐照后引起原子的移位是导致器件光电性能衰减的主要原因. 而有关 γ 射线对 GaN 基多量子阱蓝光 LED 的辐照研究的报道并不多. 本文以 γ 射线对 GaN 基多量子阱蓝光 LED 辐照实验为基础, 测试了 GaN 基蓝光 LED

辐照前后的发光强度和光通量、正向电流和电压, 分析发光强度随辐照剂量增加的衰减关系及器件辐照后的饱和电流和光通量变化, 以及这些电光学变化产生的原因.

2. 实验测试

辐照所用的 GaN 基 LED 蓝光芯片是现生产中较为普遍使用的结构, 其中包括 InGaN/GaN 多量子阱 (MQW) 结构, 量子阱结构采用金属有机物化学气相沉积 (MOCVD) 技术在蓝宝石 (0001) 衬底表面外延形成, 其中电子阻挡层为 p-AlGaN (Mg), InGaN/GaN 的量子阱结构重复周期为 5 层, 如图 1 所示.

γ 辐照是在扬州市里下河农科所 4×10^4 Ci ($1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$) 的 ^{60}Co 源上 (剂量率 $2 \times 10^5 \text{ rad(Si)/h}$) 进行的, 样品采用同一批次的蓝光 LED, 4 个为一组分别给予 2×10^5 , 8×10^5 , 1.6×10^6 , 3.2×10^6 , $7 \times 10^6 \text{ rad(Si)}$ 5 种吸收剂量, 分别记为样品 #A, #B, #C, #D, #E. 样品各项参数用杭州星谱光电科技有限公司 SSP3112 型 LED 光电参数综合测试仪采集, 数据分别取每组样品的平均值. 在器件的 I - V 测试中, 我们取正向电流范围为 $1 \mu\text{A}$ — 1 mA , 测量光通量的电流稳定性时, 电流变化范围为 1 — 50 mA .

^{*} 江苏省自然科学基金 (批准号: BG2007026) 资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: xhzeng@yzu.edu.cn

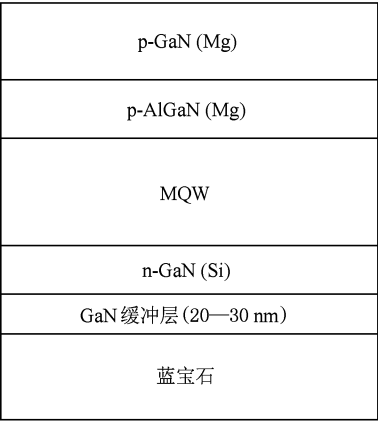


图 1 LED 的外延结构图

3. 结果与分析

3.1. 光学分析

辐照结束后,首先测得的是 LED 发光波长随辐照吸收剂量增加的变化关系,如图 2,3 所示. 蓝光 LED 的主波长随增加的辐照剂量发生漂移,红移约 5 nm;同时峰值波长红移 2 nm,在图中色纯度也随着剂量的增加而降低,从 0.975 下降到 0.929,而在 20 mA 的工作电流下 FWHM 增加约 1 nm. γ 辐照与材料间的相互作用主要通过产生高能康普顿电子完成,原子的移位是由康普顿电子与核子的交换作用对 γ 光子的吸收而产生. 光谱的展宽可能是 γ 光子能量传递给原子晶格,原子位移引起阱区富 In 量子点变得更大、更少,使得量子点处的 In 组分更大^[7] (见图 4),所以发光波长发生红移;同时 InGaIn/GaN 量子阱界面处晶格常数失配引起的联结应力导致压电场的产生,即量子限制 Stark 效应作用,结果使载流子寿命降低和光谱展宽.

在得到被测样品的波长的同时,我们还测到了 LED 的发光强度. 辐照前实验用蓝光 LED 的平均发光强度为 3061 mcd(20 mA 下测量). 辐照后从图 5 看到,InGaIn/GaN 多量子阱蓝光 LED 发射波长除了在 460 nm 附近有轻微的红移外,并未发现有杂峰的出现,但是发光强度随着辐照剂量的增加逐渐递减,在 7.0×10^6 rad (Si) 剂量下 #E 样品的发光强度已削弱至 423 mcd,衰减近 90%. 图 5 中发光强度的削弱是由于 γ 辐照在量子阱区引入非辐射复合中心引起的,使少数寿命降低. 辐照后的少数载流子

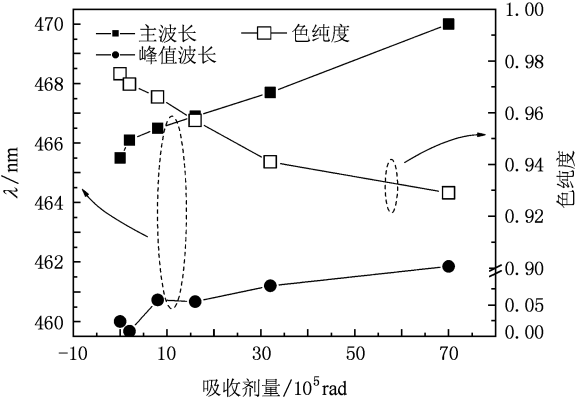


图 2 发光波长 λ 随吸收剂量的变化

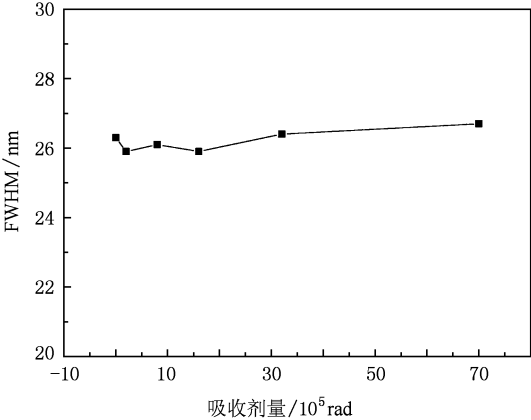


图 3 FWHM 随吸收剂量的变化

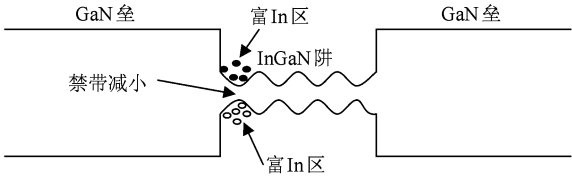


图 4 InGaIn 阱区能带变化

寿命可以表示为^[8]

$$1/\tau_{\gamma} = 1/\tau_0 + K_{\gamma}\Phi, \tag{1}$$

其中 τ_0 为辐照前的少数寿命, τ_{γ} 为 γ 辐照后少数载流子寿命, 而 K_{γ} 称之为辐照损伤系数, 方程(1)又可写为

$$\tau_0/\tau_{\gamma} = 1 + \tau_0 K_{\gamma}\Phi. \tag{2}$$

LED 的发光强度可以表示为^[9]

$$L = C_{\tau}\tau\exp\left(\frac{qv}{kT}\right), \tag{3}$$

其中 C_{τ} 为常数. 将(3)式代入(2)式, 即得

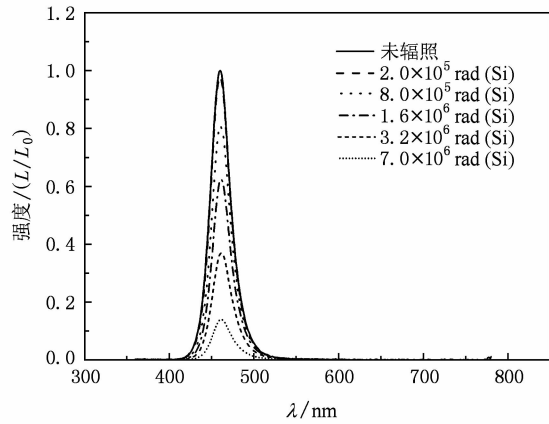


图 5 LED 发光强度随吸收剂量变化

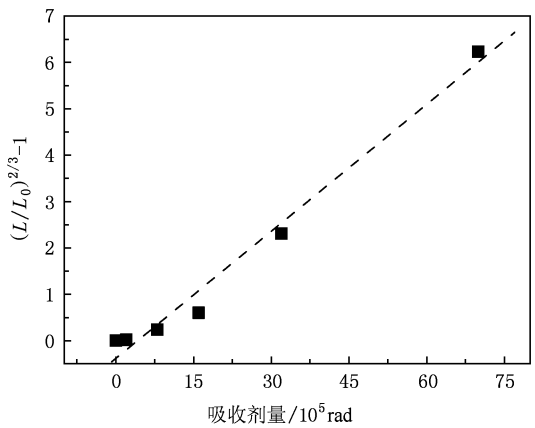


图 6 $(L_0/L)^{2/3} - 1$ 随吸收剂量增加的变化关系

$$\frac{L_0 \exp(-qv_0/kT)}{L \exp(-qv/kT)} = 1 + \tau_0 K_\gamma \Phi, \quad (4)$$

(4)式表示了发光强度 L 与少子寿命和辐照损伤系数的关系. 其中 L_0, V_0 为辐照前的发光强度和正向偏压, L, V 为辐照后的相应参数. 所以根据 Rose 和 Barnes^[9] 的研究, 在定值电流条件下, (4) 式也可简化为

$$\left(\frac{L_0}{L}\right)^n - 1 = \tau_0 K_\gamma \Phi, \quad (5)$$

式中, n 的值取决于电流注入机理, 当扩散电流主导控制时, $n = 2/3$, 而当空间电荷的复合电流主导时, $n = 1/3$. 我们的器件发光强度均在 20 mA 条件下测量得到, 从我们下文 I - V 的分析发现, 此时扩散电流主控电流注入机理, 则 $n = 2/3$, 所以 (5) 式变为

$$\left(\frac{L_0}{L}\right)^{2/3} - 1 = \tau_0 K_\gamma \Phi. \quad (6)$$

可以根据 $(L_0/L)^{2/3} - 1$ 与 γ 辐照剂量 Φ 的关系图 (见图 6), 提取斜率即实验所用 LED 样品 $\tau_0 K_\gamma = 4.039 \times 10^{-7} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$. 综上所述, 从 20 mA 下测得的光学参数分析, γ 辐照对 GaN 基多量子阱 LED 的光学影响较大.

3. 2. 电学分析

图 7 是不同剂量下光通量随电流增加的变化曲线, 我们发现相同的电流下, 随辐照总剂量的增大导致 LED 光通量的衰减. 如图 7 中在 20 mA 下, 光通量随总剂量增加从 0.35 lm, 0.34 lm, 0.28 lm, 0.23 lm, 最终衰减至 0.21 lm, 衰减了 40%.

在双对数坐标下, 如图 8 所示光通量 F 与电流 I 呈很好的线性关系, 可以近似表示为

$$\lg F = \alpha \lg I + \beta. \quad (7)$$

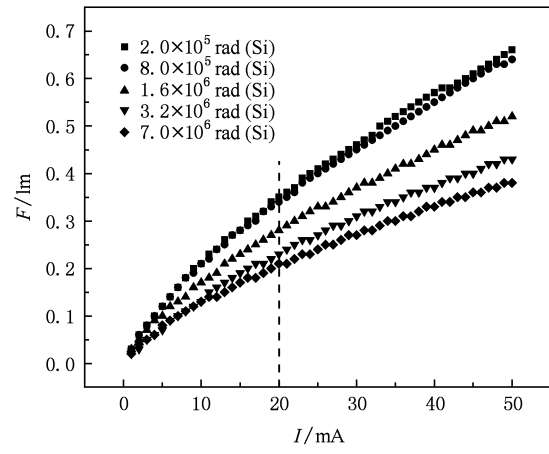


图 7 电流和光通量随吸收剂量的变化关系

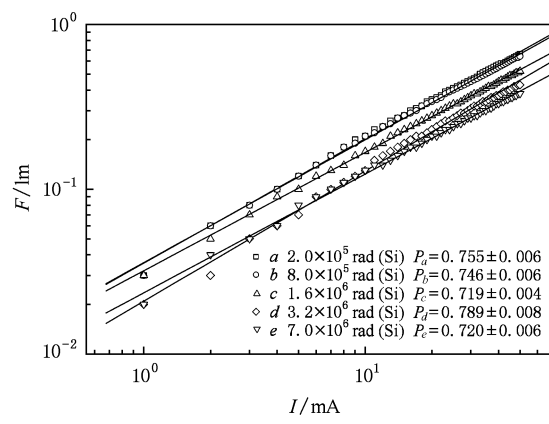


图 8 双对数坐标下, 电流和光通量的关系 P_a-P_e 为对应的直线斜率

线性拟合后直线斜率 $\bar{\alpha} = 0.746 \pm 0.006$, 即函数可以写为

$$\lg F = (0.746 \pm 0.006) \lg I + \beta, \quad (8)$$

其中直线的截距 β 因子与辐照的总剂量有关,且随总剂量的增加,我们发现纵轴上截距在逐渐减小.

同时,为研究辐照对发光二极管的电学稳定性,我们测量得到辐照后样品的 I - V 关系,对于 LED 的 I - V 关系满足

$$I = I_d \exp \left[\frac{q(V - IR_s)}{kT} \right] + I_r \exp \left[\frac{q(V - IR_s)}{2kT} \right], \quad (9)$$

式中 I_d 及 I_r 分别是由扩散及复合所引起的饱和电流, R_s 为器件的串联电阻. 由如图 9 在高的正向偏压下 I - V 的关系,得到 $R_s = (10.399 \pm 0.082) \, \Omega$.

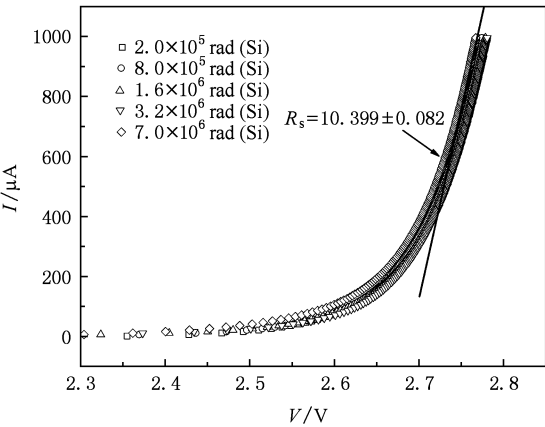


图 9 随吸收剂量变化的 I - V 关系图

若忽略 R_s 对工作电流的影响, (9) 式可以简化为

$$I = I_d \exp[\alpha V] + I_r \exp(\beta V). \quad (10)$$

如图 10 所示,在 $1 \, \mu\text{A}$ — $1 \, \text{mA}$ 的电流范围内, I - V 关系曲线呈现 2 段不同区域^[10]:

当 $V > 2.6 \, \text{V}$ 时

$$I = 3.0 \times 10^{-15} \exp[(14.7 \pm 0.5) V].$$

但当 $V < 2.6 \, \text{V}$ 时, $\Phi = 2.0 \times 10^5, 8.0 \times 10^5, 1.6 \times 10^6, 3.2 \times 10^6, 7.0 \times 10^6 \, \text{rad}(\text{Si})$ 时, 电流 I 的值分别如下:

$$\begin{aligned} I_a &= 5.6 \times 10^{-15} \exp[(14.2) V], \\ I_b &= 2.2 \times 10^{-13} \exp[(12.9) V], \\ I_c &= 7.1 \times 10^{-11} \exp[(10.6) V], \\ I_d &= 1.3 \times 10^{-7} \exp[(7.7) V], \\ I_e &= 3.5 \times 10^{-9} \exp[(9.3) V]. \end{aligned}$$

我们知道在低偏压 ($V < 2.6 \, \text{V}$) 下器件的复合电流比扩散电流更占优势^[10,11], 从计算结果发现随

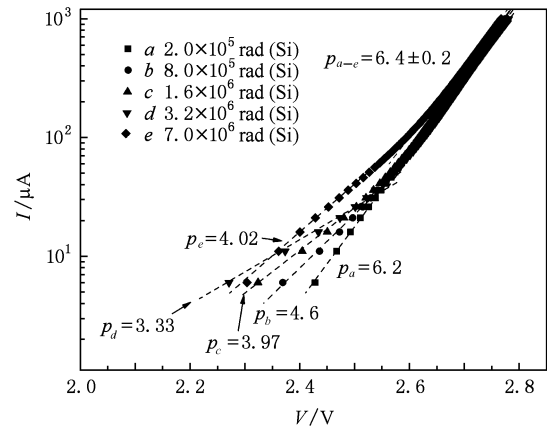


图 10 单对数 I - V 函数关系图 $V > 2.6 \, \text{V}$ 时, p_{a-e} 为拟合后直线斜率, $V < 2.6 \, \text{V}$ 时, $p_a - p_e$ 为各剂量下对应拟合后的直线斜率

着辐照总剂量的增加,被测器件在较低正向偏压下 ($V < 2.6 \, \text{V}$) 饱和电流出现增大,虽在 $7.0 \times 10^6 \, \text{rad}(\text{Si})$ 的辐照剂量下饱和电流出现减小现象,我们估计是器件个体差异所引起的个别现象,此时饱和电流的增大归结于此时二极管的非辐射性的复合电流的增大. 我们知道 γ 射线不会直接产生电离化作用,所以二级电子效应应该是产生新复合中心的主要原因,因此辐照后引起较低正向偏压下饱和电流增加的原因可能是二级电子效应导致禁带中浅施主能级如氮空位的引入和深受主型陷阱的产生,且这些空位和陷阱的浓度会随辐照总剂量增加而增加. 但在较高偏压下 ($V > 2.6 \, \text{V}$), 我们发现 5 个不同剂量下样品的 I - V 关系曲线的斜率近似相等,归结于二极管的辐射性扩散电流,而扩散电流主要与器件本身结构和掺杂浓度有关,此时可忽略复合电流对饱和电流的影响.

4. 结 论

γ 辐照对 GaN 基蓝光 LED 的失效有着重要影响. 我们通过对 GaN 基蓝光 LED 进行辐照实验得到以下结论:从主波长和纯度的变化看,辐照引起器件 InGaN/GaN 量子阱中量子点的聚集和再分布,使器件发光的均匀性和一致性变差;量子阱中非辐射复合中心浓度随总剂量的增加而增加,用 $\tau_0 K_\gamma$ 值的大小来描述 LED 抗辐照能力;从光通量看,在 1 — $50 \, \text{mA}$ 电流范围内,光通量和电流满足幂函数关系,其中 γ 辐照总剂量的增加引发截距 β 因子的变小; I - V 是发光二极管的重要参数,从我们的实验发现,在较低电压 (小于 $2.6 \, \text{V}$) 下,辐照引起二极管的复

合电流的增加,从而饱和电流增加,而较高的正向偏压下(大于2.6 V)饱和电流中扩散电流起主导作用,此时饱和电流随辐照总剂量的增加几乎不变,

因此 GaN 基多量子阱 LED 工作在低正向偏压下时,辐照对器件的电学影响值得关注,而工作在较高正向偏压下辐照引起器件的光学衰减更明显.

- [1] Ionascut Nedelcescu A, Carlone C, Houdayer A, von Bardeleben H J, Cantin J L, Raymond S 2002 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **49** 2733
- [2] Tataroglu A, Altindal S 2006 *Nucl. Instru. Meth. Phys. Res. B* **252** 257
- [3] Yang L X, Du L, Bao J L, Zhuang Y Q, Chen X D, Li Q W, Zhang Y, Zhao Z G, He L 2008 *Acta. Phys. Sin.* **57** 5869 (in Chinese) [杨丽侠、杜磊、包军林、庄奕琪、陈晓东、李群伟、张莹、赵志刚、何亮 2008 物理学报 **57** 5869]
- [4] Zhang L, Zhang Y M, Zhang Y M, Han C, Ma Y J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2737 (in Chinese) [张林、张义门、张玉明、韩超、马永吉 2009 物理学报 **58** 2737]
- [5] Umana-Membreno G A, Dell J M, Parish G, Nener B D, Faraone L, Mishra U K 2003 *IEEE Trans. Elec. Dev.* **50** 1998

- [6] Li C S, Subramanian S 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 1998
- [7] Liu N X, Wang H B, Liu J P, Niu N H, Zhang N G, Li T, Xing Y H, Han J, Guo X, Shen G D 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1424 (in Chinese) [刘乃鑫、王怀兵、刘建平、牛南辉、张念国、李彤、邢艳辉、韩军、郭霞、沈光地 2006 物理学报 **55** 1424]
- [8] Barnes C E 1979 *IEEE Trans. Electr. Devices* **26** 739
- [9] Rose B H, Barnes C E 1982 *J. Appl. Phys.* **43** 1772
- [10] Martil I, Redondo E, Ojeda A 1997 *J. Appl. Phys.* **81** 2442
- [11] Sze S M 2002 *Semiconductor Devices Physics and Technology* (2nd Ed.) (Suzhou: Suzhou University Press) p283 (in Chinese) [施敏 2002 半导体器件物理与工艺(第二版)(苏州:苏州大学出版社)第283页]

Gamma radiation effect on GaN-based blue light-emitting diodes with multi-quantum well*

Jin Yu-Zhe Hu Yi-Pei Zeng Xiang-Hua[†] Yang Yi-Jun

(College of Physics & Technology, Yangzhou University, Yangzhou 225002, China)

(Received 4 May 2009; revised manuscript received 26 June 2009)

Abstract

We study the irradiation effects of the GaN-based blue light-emitting diodes(LEDs) with InGaN/GaN multi-quantum well irradiated by five doses of ^{60}Co (4×10^4 Ci) at room temperature. From the analyses of the characteristics of the current-voltage (I - V) relation, current-luminous flux (F - L) relation, chromatic purity, luminous intensity, luminous flux, the full width at half maximum, and the wavelength of LEDs samples before and after irradiation, we obtain the effects of γ irradiation on the devices. It shows that the consistency and uniformity of the samples become worse after irradiation. At the 20 mA working current, the luminous intensity reduces by 90% and the luminous flux falls by 40% at the maximum total dose. The quantity $\tau_0 K_\gamma$ describing the radiation hardness of the LEDs is equal to $4.039 \times 10^{-7} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$, and the saturation current increases at lower positive bias ($< 2.6 \text{ V}$) with the increasing total dose.

Keywords: GaN, light-emitting diodes, gamma irradiation, radiation effect

PACC: 7280E, 7865K, 6180E, 7340L

* Project supported by the Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China (Grant No. BG2007026).

[†] Corresponding author. E-mail: xhzheng@yzu.edu.cn