

文章编号: 2095-4980(2022)06-0543-06

氮化镓基白光发光二极管的快中子辐照效应

魏彪¹, 傅翔¹, 汤戈², 陈飞良³, 李沫^{*3}

(1.重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044; 2.成都理工大学 核技术与自动化工程学院, 四川 成都 610059;
3.电子科技大学 电子科学与工程学院, 四川 成都 610054)

摘要: 对注入量为 $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 的快中子(1.2 MeV)对氮化镓(GaN)基白光发光二极管(LED)器件的辐照效应进行研究。通过测量和分析器件的电致发光谱(EL)、光功率-电流($L-I$)和电流-电压($I-U$)特性,发现器件辐照后光功率降低,而EL谱形状几乎没有变化,表明该注入量的中子辐照主要对器件中的蓝光LED芯片造成了损伤。进一步分析发现,中子辐照导致蓝光LED量子阱中产生大量非辐射复合中心,增加了漏电流并减小了量子阱中载流子密度,从而降低LED的输出光功率。由此,在原有GaN基蓝光LED等效电路模型的基础上,加入由中子辐照导致的影响因素,不仅有助于理解中子辐照对LED光功率的衰退影响机理,还为预测辐照后光功率的变化提供了可行性。

关键词: 中子辐照; 氮化镓; 发光二极管; 缺陷

中图分类号: TN312⁺.8; O47

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022001

Fast neutron irradiation effects on white Gallium Nitride light-emitting diodes

WEI Biao¹, FU Xiang¹, TANG Ge², CHEN Feiliang³, LI Mo^{*3}

(1.Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2.The College of Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan 610059, China; 3.School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 610054, China)

Abstract: The irradiation effect of fast neutrons(1.2 MeV) on Gallium Nitride(GaN) white Light-Emitting Diodes(LEDs) with fluence of $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ is reported. The Electroluminescence(EL) spectrum, output power-current($L-I$) and current-voltage($I-U$) characteristics of the device are measured and analyzed. It is found that the optical output power decreasing after irradiation, while the shape of the EL spectrum almost remains unchanged, indicating that the neutron irradiation mainly causes damage to the blue LED chip. Further analysis shows that neutron irradiation leads to the generation of a large number of nonradiative recombination centers in the quantum well, which increases the leakage current and decreases the carrier density, thus reducing the output power of LED. In addition, the influencing factors caused by neutron irradiation are added to the original equivalent circuit model of GaN-based LEDs. This model not only helps to understand the mechanism of the degradation of the neutron irradiation on the LED output power, but also provides a feasible method to predict the change of the output power after irradiation.

Keywords: neutron irradiation; GaN; Light-Emitting Diodes; defects

氮化镓(GaN)作为第三代半导体材料的代表,具有禁带宽度大、击穿场强高、饱和电子迁移速率高的特点,在高压、射频、光电等领域具有广泛的应用前景。在光电领域中,凭借其直接带隙、禁带宽度可调的优势,氮化物成为制作全固态、高效率紫外-蓝光发光二极管(LED)的重要材料体系^[1]。特别是,基于GaN基蓝光LED与黄色荧光粉制成的白光LED半导体照明光源是氮化物材料中目前最主要和最成功的应用^[2]。由于GaN材料相比

收稿日期: 2021-12-31; 修回日期: 2022-02-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61804141)

*通信作者: 李沫 email:limo@uestc.edu.cn

Si 和 GaAs 等材料体系具有更强的原子键能, 抗辐照特性更好, 因此, GaN 基白光 LED 常应用于核动力、反应堆和高能粒子对撞机等辐照环境^[3-4]。在上述场景中, GaN 白光 LED 需要承受持续的中子辐照, 一方面不带电的中子将在半导体芯片材料中通过非电离能量损失来消耗能量, 该现象具体表现为中子与半导体材料中的晶格原子碰撞并使其发生位移, 形成点缺陷、位错甚至无序区域, 影响载流子寿命和迁移率等, 进而对 LED 器件的电流和发光特性产生影响^[5-6]; 另一方面, 中子在与封装树脂材料或荧光粉作用后可能影响出光性能。因此, 研究 GaN 基白光 LED 的中子辐照效应对于加深器件抗辐照性能认知和扩展该类器件在辐照环境的应用具有积极意义。

近年来, 陆续有文献报道了中子辐照对紫外-蓝光 GaN 基 LED 器件性能的影响。LI 等研究了高注入量($10^{14} \sim 10^{15} \text{ cm}^{-2}$)的快中子辐照对 GaN 基蓝光 LED 的影响, 观测到器件光功率降低和正向电流减少, 认为其主要原因是位移损伤导致载流子寿命降低, 形成载流子去除效应^[7]。KIM 等利用能量为 9.8 MeV 的快中子在较低注入量(10^{11} cm^{-2})下辐照蓝光 LED, 辐照 6 天后经过自退火消除了中子碰撞造成的不稳定晶格损伤, LED 二极管的导通电压、理想因子和光功率也恢复至辐照前水平^[8]。SORIANO 等针对 GaN 基深紫外 LED, 在露天环境下开展了跨度 3 年、共计 244 天的持续中子辐照研究, 其最大注入量为 $2.41 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$, 能量范围 0.1~800 MeV, 通过对 $I-U$ 特性的连续监测和分析, 发现实验期间辐照对 LED 性能影响很小^[9]。FU 等报道了中等注入量($10^{12} \sim 10^{14} \text{ cm}^{-2}$)的快中子(能量 1.2 MeV)辐照 GaN 基深紫外 LED, 中子在 AlGaN 量子阱中引入 Ga 空位缺陷, 能带弯曲导致量子势垒高度增加, 提高了 LED 的内量子效率^[10]。

综上所述, 目前中子辐照 GaN 基 LED 大多集中于紫外-蓝光, 少量的中子辐照白光 LED 的研究主要是关于辐照对器件非辐射复合寿命的影响分析^[11]。白光 LED 包含蓝光 LED 芯片、封装树脂材料和荧光粉, 高能量的快中子辐照是否有特殊的效应还不清晰。此外, 国内外针对 GaN 基紫外-蓝光 LED 快中子辐照效应研究主要在于对比辐照前后的材料缺陷、外延片表面形态、 $I-U$ 特性和发光性能, 未见从 LED 的等效电路模型出发对中子辐照效应进行分析的报道。基于此, 本文利用能量为 1.2 MeV 的快中子在注入量 $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 条件下, 对 GaN 基白光 LED 开展辐照效应研究, 解释了白光 LED 发光性能的变化。此外, 通过建立与中子辐照相关的等效电路模型, 对辐照前后的 $I-U$ 曲线进行分段拟合, 获得的模型参数可用于预测辐照后器件的光功率变化。

1 实验

本文实验对象为商业化已封装的 GaN 基白光 LED(型号为 CREE XB-D), 发光单元为一个面积 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的 GaN 基蓝光 LED 芯片, 发出的蓝光再通过 YAG:Ce 荧光粉实现白光的转化。GaN 基蓝光 LED 结构示意图如图 1 所示, 包括蓝宝石衬底、n 型 GaN 层、GaN/InGaN 多量子阱区以及 p 型 GaN 层, 从 n 型层和 p 型层分别注入电子和空穴在量子阱区域复合发光。快中子辐照实验在中国工程物理研究院核物理与化学研究所 CFBR-II 反应堆中完成, 该反应堆提供的中子能量为 1.2 MeV, 注入速率 $2 \times 10^9 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。本文实验在室温条件下进行, 辐照时长 $5 \times 10^4 \text{ s}$, 对应中子辐照注入量为 $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 。样品在辐照后一周取出, 以确保放射性降低到安全剂量水平。实验中使用 Keithley 2636B 数字源表测量了 LED 器件辐照前后的 $I-U$ 特性, 根据设备参数可以得到电压和电流测量的误差范围分别在 0.02% 和 0.015% 以内。光功率由 Newport 918D 高性能光电二极管传感器测得, 在目标可见光波段的测量误差在 1% 以内。需要注意的是, 测量光功率时受条件限制并没有将出射光完全收集, 但辐照前后的测量条件保持不变以保证实验结果的可靠性。另外, 发光光谱的测量采用了博源光电的 BIM-66 高分辨率光谱仪。

2 结果和讨论

GaN 基白光 LED 辐照前后的 $L-I$ 曲线和 EL 谱分别如图 2 和图 3 所示。图 2 中离散的数据点表示实验测量值, 圆圈代表辐照前, 三角形代表辐照后。连续的线表示通过等效电路模型拟合(辐照前)和计算(辐照后)的 $L-I$ 曲线。辐照前后随着注入电流的增加, 光功率呈现出线性上升的趋势, 并在辐照后, 同一注入电流下光功率有所降低。

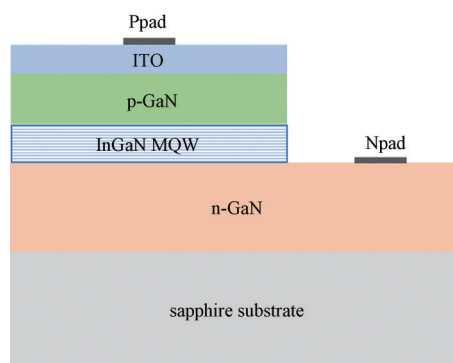


Fig.1 Cross-section schematic of the GaN-based blue light LEDs
图1 GaN基蓝光LED截面示意图

另外，从 EL 谱图中可以看出，发光光谱由 LED 自身的蓝光峰和 YAG:Ce 荧光粉受激发后发出的黄光峰组成，在辐照前后荧光峰峰位几乎没有发生变化，也没有出现新的发光峰。说明荧光粉层、封装树脂和蓝宝石衬底没有出现新的发光中心，即该中子注入量不足以对以上材料造成显著影响，与文献报道上述材料具有很强的抗辐照特性一致^[12-13]。计算发现器件辐照后的蓝光强度与黄光强度之比(即发光峰面积之比)有一定减小，从 0.203 降低至 0.176。由于荧光粉性能在辐照下没有发生明显的衰退，因此可认为辐照后蓝光强度与黄光强度之比和光功率衰减的根本原因是蓝光 LED 受到辐照损伤所致。因此本文后续对器件中子辐照的分析和讨论也主要针对蓝光 LED 的损伤。

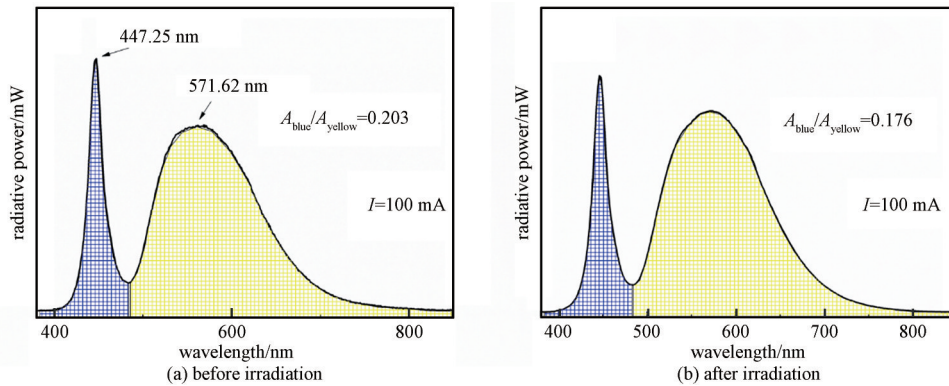


Fig.3 EL spectra before and after irradiation at the inject current of 100 mA

图 3 辐照前和辐照后注入电流 100 mA 时的 EL 谱

图 4 为辐照前后 LED 器件的正向 $I-U$ 曲线。其中， $I-U$ 曲线在低压区 ($U < 0.8$ V) 是由热辅助多步隧穿产生的泄漏电流占主导，中子辐照增加了材料的缺陷密度，因此加剧了隧穿电流^[14]。对于辐照前 $I-U$ 曲线更高的电压区域 ($U > 0.8$ V)，有两种不同的电流状态：a) 区域 A (0.8 V $< U < 2.2$ V) 的漏电流归于材料原有杂质和与生长相关缺陷引起的非辐射复合电流^[15-16]；b) 区域 B ($U > 2.2$ V)，电流先快速上升，后由于 LED 的串联电阻导致 $I-U$ 曲线弯曲，该区域电流主要来自量子阱中的辐射复合。与辐照前情况不同，辐照后电压从 1.9 V 开始直到 2.6 V 的区域内 $I-U$ 曲线斜率为恒定，说明载流子的动力学行为在辐照后发生了变化，并形成了一定的漏电流通路。这种载流子运动的改变可用理想因子来区分，根据 Shockley 二极管理论，载流子扩散形成的电流理想因子为 1，而通过带隙中缺陷能级非辐射复合形成的电流理想因子为 2^[17-18]。对该电压区域的电流进行分析，发现辐照后的 LED 理想因子接近 2，因此可以判定该漏电流来自缺陷能级的非辐射复合电流^[19]。由此可以推断辐照引入了新的缺陷，且导电机理和辐照前不同，非辐射复合缺陷的增加，降低了量子阱中参与辐射复合的载流子浓度，进而降低了器件发光功率。

基于上述对 $I-U$ 曲线的分析，并依据现有解释非理想状态 GaN 基 LED 的电路模型^[16,20]，建立了针对辐照前后的 GaN 基 LED 等效电路模型，从而分析中子辐照对 LED 光电特性的影响。图 5(a) 为辐照前的等效电路模型。其中，电流 I_p 为在区域 A 电压下由于非辐射复合而产生的泄漏电流，电流 I_M 为存在于量子阱(区域 B)中的辐射复合和非辐射复合电流，电流 I_{sh} 为在低电压下的热辅助多步隧穿漏电流， R_s 为 LED 金属电极接触引入的串联电阻。

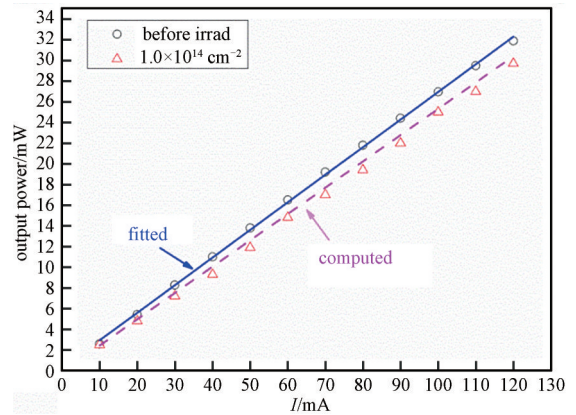


Fig.2 $L-I$ curves before and after irradiation at room temperature

图 2 室温下白光 LED 辐照前后 $L-I$ 曲线

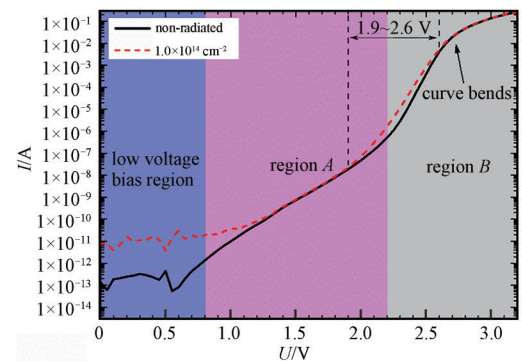


Fig.4 $I-U$ curves at room temperature before and after irradiation

图 4 室温下白光 LED 辐照前后 $I-U$ 曲线

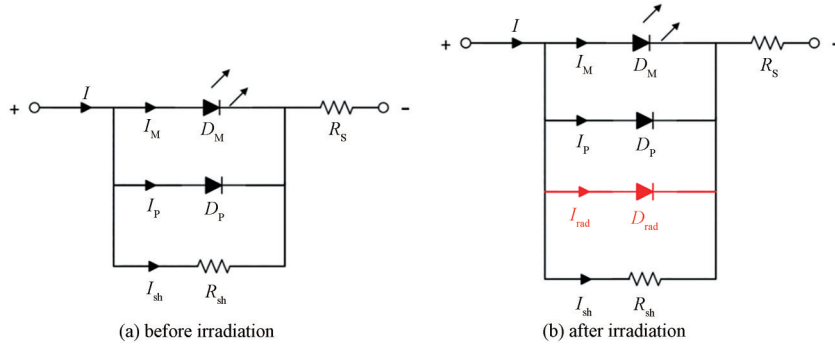


Fig.5 Equivalent circuit model before and after irradiation
图 5 LED 器件辐照前后的等效电路模型

辐照前的 $I-U$ 关系式为:

$$I = I_{SM} \left[\exp\left(\frac{qU'}{\eta_M k_B T}\right) - 1 \right] + I_{SP} \left[\exp\left(\frac{qU'}{\eta_P k_B T}\right) - 1 \right] + \frac{U'}{R_{sh}} \quad (1)$$

式中: q 为绝对电子电荷; k_B 为玻兹曼常数; T 为温度; $U' = U - R_s I$ 。

以饱和电流 I_{SM} 和 I_{SP} 、理想因子 η_M 和 η_P 、电阻 R_{sh} 和 R_s 为拟合变量, 基于式(1)对辐照前的 $I-U$ 曲线分别进行低压区 ($U < 0.8$ V)、区域 A (0.8 V $< U < 2.2$ V) 和区域 B ($U > 2.2$ V) 分段拟合, 并得到其分量^[21], 如图 6 虚线所示。其中, 采用的拟合参数如表 1 所示, 可以看到, 拟合结果与测试结果匹配较好。

表 1 辐照前 $I-U$ 曲线拟合参数

Table1 $I-U$ curve fitting parameters before irradiation

parameters	I_{SM}/A	I_{SP}/A	η_M	η_P	R_{sh}/Ω	R_s/Ω
values	2.69×10^{-31}	2.26×10^{-15}	1.53	4.51	2.06×10^{12}	1.78

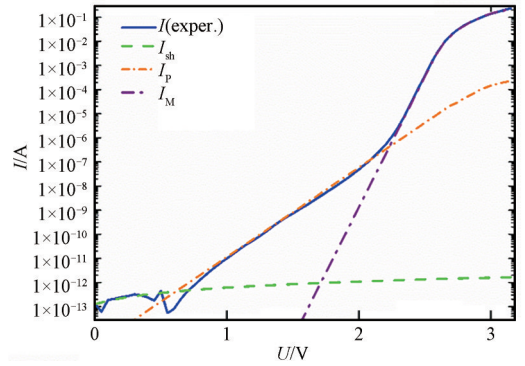


Fig.6 Measured GaN LED $I-U$ curves at room temperature before irradiation (solid line) and computed current components (dashed lines)

图 6 室温下辐照前 GaN LED $I-U$ 曲线的实验结果 (实线) 以及计算出的各电流分量 (虚线)

对于辐照前的 LED, 发光主要存在于区域 B, 且该区域电流由进入量子阱的 I_M 主导, 因此光功率-电流的关系式可认为是: $L = f(I) = f(I_M)$ 。其具体表现可由描述量子阱中电流 I_{QW} 与载流子密度 n 关系的 ABC 模型解释^[20]:

$$\frac{I_{QW}}{qV_{act}} = An + Bn^2 \quad (2)$$

式中: V_{act} 为量子阱体积; A 和 B 分别为非辐射复合与辐射复合因子。本实验测得的 $L-I$ 曲线, 电流范围为 10~120 mA, 此时量子阱中载流子密度较大, $Bn^2 \gg An$, 电流由辐射复合主导, 因此可得到 $I_{QW} \propto Bn^2$ 以及 $L \propto I_{QW}$ 。基于此, L 与 $f(I_M)$ 的关系式可表示为:

$$L = CI_M + D \quad (3)$$

式中 C, D 为拟合参数。当拟合参数 $C=0.267, D=0.255$ 时, 得到的拟合结果如图 2 中实线所示, 其与实测的数据点有较好的对应关系。

基于图 5(a) 所示的模型, 辐照后的 LED 额外增加了二极管 D_{rad} , 代表中子辐照在量子阱中引入新的非辐射复合中心, 如图 5(b) 所示。 D_M 为量子阱中的辐射复合和原有缺陷的非辐射复合, 但 I_M 已经不能再代表进入量子阱的总电流。辐照后量子阱中总电流应表示为: $I_{QW} = I_M + I_{rad}$, 此时的 $I-U$ 特性表示为:

$$I = I_M + I_P + \frac{U'}{R_{sh}} + I_{Srad} \left[\exp\left(\frac{qU'}{\eta_{rad} k_B T}\right) - 1 \right] \quad (4)$$

中子辐照引入非辐射复合中心后, 量子阱中电流和载流子密度关系为:

$$\frac{I_{QW}}{qV_{act}} = \underbrace{\frac{An+Bn^2}{\propto I_M}} + \underbrace{F(n)}_{\propto I_{rad}} \quad (5)$$

式中与缺陷密度有关的 $F(n)$ 为辐照引入的非辐射复合中心，且对光功率没有贡献，LED 的发光功率仍由参与辐射复合的 I_M 决定。此外，辐照后载流子密度 n 与 I_M 的关系保持不变，则式(2)中参数 A, B 也不受辐照影响。因此，可推断出光功率 L 和 I_M 的关系同辐照前保持一致。同理，式(3)也适用于辐照后的 $L-I$ 关系。

因为量子阱中辐射复合和基于原有缺陷的非辐射复合导电机制在辐照后保持不变，因此 η_M 取值与辐照前一致。同理，在电压区域 A 中原有缺陷的非辐射复合不受辐照影响，则模型中等效二极管 D_p 的拟合参数和辐照前相同。基于这些结论，利用式(4)，对辐照后的 $I-U$ 特性进行拟合，将 $I_{SM}, I_{Srad}, \eta_{rad}, R_{sh}$ 和 R_s 设置为拟合变量，而 η_M, I_{SP} 和 η_p 取辐照前 $I-U$ 曲线拟合求得的数值。图 7 中虚线为拟合得到的辐照后各电压区域电流分量。从图中可以看到，高电压区域中的电流由辐射复合电流 I_M 和缺陷引入的非辐射复合电流 I_{rad} 构成。非辐射复合电流的出现减少了进入量子阱中的载流子数量，使辐射复合电流变小。基于式(3)，利用拟合所获得的 I_M 数值，计算出辐照后的 $L-I$ 关系，如图 2 中的虚线所示，计算结果与实测结果吻合很好。因此，只要获得辐照前的 $L-I$ 曲线和辐照前后的 $I-U$ 曲线，就可以预测辐照后光功率的变化情况。

表 2 为辐照后器件的部分拟合参数，进一步对比和分析辐照前后的数据，可以发现， R_{sh} 在辐照后减小，这反映出由于中子辐照引起的缺陷密度增加，在正向低压下热辅助多步隧道效应增强。辐照在量子阱中引入非辐射复合中心，导致量子阱非辐射复合电流分量 I_{rad} 的出现，引起辐射复合电流分量 I_M 的减小，即拟合参数 I_{SM} 减小，光功率也因此降低。串联电阻 R_s 几乎没有变化，说明该注入量的中子辐照对金属电极性能影响很小^[22]。

表 2 辐照后 $I-U$ 曲线拟合参数

Table 2 Fitting parameters of $I-U$ curve after irradiation

parameters	I_{SM}/A	I_{Srad}/A	η_{rad}	R_{sh}/Ω	R_s/Ω
values	1.43×10^{-31}	1.3×10^{-20}	2.6	3.26×10^{10}	1.76

3 结论

本文研究了能量为 1.2 MeV、注入量 $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 中子对 GaN 基白光 LED 的辐照效应。测试发现辐照后器件 EL 谱形状相比辐照前几乎没有变化，也没有出现新的发光峰，但蓝光峰的强度与黄光峰的强度比例有所降低，表明辐照仅对器件中的蓝光 LED 芯片造成了损伤。本文建立了一个与辐照关联的 LED 器件等效电路模型，通过对 $L-I$ 曲线和 $I-U$ 曲线进行拟合，发现中子辐照在量子阱中引入了非辐射复合中心并形成非辐射复合电流，漏电流的增加降低了量子阱中的载流子浓度，从而导致发光功率降低；同时可以据此预测辐照后发光功率的变化。

致谢： 本文感谢中国工程物理研究院电子工程研究所康健彬、李倩对本论文在实验、撰写方面提供的指导和帮助。感谢中国工程物理研究院核物理与化学研究所郑春、李俊杰、陆伟在中子辐照实验方面的帮助。本研究得到了国家自然科学基金资助项目(61804141)的支持。

参考文献：

[1] LEE I H, POLYAKOV A Y, SMIRNOV N B, et al. Changes in electron and hole traps in GaN-based light emitting diodes from near-UV to green spectral ranges[J]. Applied Physics Letters, 2017, 110(19):192107.

[2] CAO H, MA Z, SUN B, et al. Composite degradation model and corresponding failure mechanism for mid-power GaN-based white LEDs[J]. AIP Advances, 2018, 8(6):065108.

[3] DEVINE J D, FLORIDUZ A. Radiation hardening of LED luminaires for accelerator tunnels[C]// 2016 16th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems(RADECS). Bremen, Germany: IEEE, 2016:1-6.

[4] FLORIDUZ A, DEVINE J D. Radiation testing of optical and semiconductor components for radiation-tolerant LED luminaires [C]//2018 18th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems(RADECS). Göteborg, Sweden:

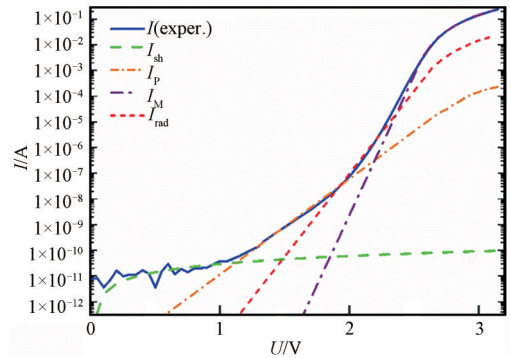


Fig.7 Experimental $I-U$ curves at room temperature after $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ neutron radiation (solid line) and computed current components (dashed lines)

图 7 室温下，注入量 $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 中子辐照后， $I-U$ 曲线的实验结果(实线)以及计算出的各电流分量(虚线)

- IEEE, 2018:1–8.
- [5] PEARTON S J,REN F,PATRICK E,et al. Ionizing radiation damage effects on GaN devices[J]. ECS Journal of Solid State Science and Technology, 2015,5(2):Q35.
- [6] POLYAKOV A Y,LEE I H. Deep traps in GaN-based structures as affecting the performance of GaN devices[J]. Materials Science and Engineering:R:Reports, 2015(94):1–56.
- [7] LI C S,SUBRAMANIAN S. Neutron irradiation effects in GaN-based blue LEDs[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2003,50(6):1998–2002.
- [8] KIM H Y,KIM J,REN F,et al. Effect of neutron irradiation on electrical and optical properties of InGaN/GaN light-emitting diodes[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, 2010,28(1):27–29.
- [9] SORIANO L,VALENCIA H,SUN K X,et al. Fast neutron irradiation effects on multiple Gallium Nitride (GaN) device reliability in presence of ambient variations[C]// 2020 IEEE International Reliability Physics Symposium(IRPS). Dallas,TX,USA:IEEE, 2020:1–6.
- [10] FU X,KANG J,TANG G,et al. Fast neutron irradiation effects on AlGaIn deep ultraviolet light emitting diodes[J]. Results in Physics, 2021(27):104532.
- [11] GRIDIN V N,RYZHIKOV I V,VINOGRADOV V S. A study of the effect of fast neutrons and electrons on white and blue LEDs[J]. Semiconductors, 2009,43(13):1690–1694.
- [12] AUFRAY E,FEDOROV A,DORMENEV V,et al. Optical transmission damage of undoped and Ce doped $Y_3Al_5O_{12}$ scintillation crystals under 24 GeV protons high fluence[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 2017(856):7–10.
- [13] IZERROUKEN M,DJOUADI Y,ZIROUR H. Annealing process of F^- and F^+ -centers in Al_2O_3 single crystal induced by fast neutrons irradiation[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, 2014(319):29–33.
- [14] MEYAARD D S,SHAN Q,DAI Q,et al. On the temperature dependence of electron leakage from the active region of GaInN/GaN light-emitting diodes[J]. Applied Physics Letters, 2011,99(4):041112.
- [15] KIM H,CHO J,PARK Y,et al. Leakage current origins and passivation effect of GaN-based light emitting diodes fabricated with Ag p-contacts[J]. Applied Physics Letters, 2008,92(9):172–174.
- [16] JUNG E,LEE J K,KIM M S,et al. Leakage current analysis of GaN-based light-emitting diodes using a parasitic diode model[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2015,62(10):3322–3325.
- [17] HAN D P,ZHENG D G,OH C H,et al. Nonradiative recombination mechanisms in InGaIn/GaN-based light-emitting diodes investigated by temperature-dependent measurements[J]. Applied Physics Letters, 2014,104(15):151108.
- [18] LEE I H,POLYAKOV A Y,SMIRNOV N B,et al. Point defects controlling non-radiative recombination in GaN blue light emitting diodes:insights from radiation damage experiments[J]. Journal of Applied Physics, 2017,122(11):115704.
- [19] LEE G W,SHIM J I,SHIN D S. On the ideality factor of the radiative recombination current in semiconductor light-emitting diodes[J]. Applied Physics Letters, 2016,109(3):031104.
- [20] BINDER M,GALLER B,FURITSCH M,et al. Investigations on correlation between $I-V$ characteristic and internal quantum efficiency of blue(AlGaIn) N light-emitting diodes[J]. Applied Physics Letters, 2013,103(22):221110.
- [21] LAGARIAS J C,REEDS J A,WRIGHT M H,et al. Convergence properties of the Nelder-Mead simplex method in low dimensions[J]. SIAM Journal on Optimization, 1998,9(1):112–147.
- [22] KATZ E J,LIN C H,QIU J,et al. Neutron irradiation effects on metal-gallium nitride contacts[J]. Journal of Applied Physics, 2014,115(12):123705.

作者简介:

魏 彪(1963–), 男, 浙江省嘉兴市人, 研究员, 主要研究方向为光电成像及测控技术与系统 .email:weibiao@cqu.edu.cn.