

文章编号: 1000-7032(2012)08-0869-04

电子束辐照对 GaN 基 LED 发光性能的影响

于莉媛^{1,3}, 牛萍娟^{1,3}, 邢海英^{2,3*}, 侯 莎^{2,3}

(1. 天津工业大学 电气工程与自动化学院, 天津 300387;

2. 天津工业大学 电子与信息工程学院, 天津 300387;

3. 大功率半导体照明应用系统教育部研究中心, 天津 300387)

摘要: 研究了不同能量的电子束辐照对 GaN 基发光二极管 (Light emitting diode, LED) 发光性能的影响。利用实验室提供的电子束模拟空间电子辐射, 对 GaN 基 LED 外延片进行 1.5, 3.0, 4.5 MeV 电子束辐照实验, 并应用光致发光 (Photoluminescence, PL) 谱测试发光性能。结果表明: 在 1.5 MeV 电子束辐照下, 采用 10 kGy 剂量辐照时, LED 的发光强度增加约 25%; 而在 100 kGy 剂量辐照时, LED 的发光强度降低约 16%。3 MeV 的电子束辐照可使原来色纯度不高的 LED 的色纯度变好, 而更高能量的辐照将会引起器件失效。

关键词: 电子束辐照; LED; 发光性能; 氮化镓

中图分类号: TN305.94

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fjxb20123308.0869

Influence of Electron Beam Irradiation on The Luminescence Properties of GaN-based LED

YU Li-yuan^{1,3}, NIU Ping-juan^{1,3}, XING Hai-ying^{2,3*}, HOU Sha^{2,3}

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China;

2. School of Electronics and Information Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China;

3. Engineering Research Center of High Power Solid State Lighting Application System,

Tianjin Polytechnic University, Ministry of Education, Tianjin 300387, China)

* Corresponding Author, E-mail: hy.xing@yahoo.com.cn

Abstract: The influence of different energy electron beam irradiation on the luminescence properties of GaN-based LED has been studied. GaN-based LED epitaxial wafers are irradiated under the simulation of space electron radiation by 1.5, 3.0, 4.5 MeV electron beam irradiation in the laboratory and photoluminescence (PL) spectra is applied to measure luminescent properties. The results show that LED luminous intensity increase about 25% when the radiation doses is 10 kGy with electron energy is 1.5 MeV, while reduced ~16% in dose irradiation in 100 kGy. Under 3 MeV electron beam irradiation, the color purity of LED increased, while in the higher energy irradiation the device failed.

Key words: electron-beam irradiation; LED; luminescent properties; GaN

收稿日期: 2012-04-28; 修订日期: 2012-05-30

基金项目: 国家 863 计划 (2010AA03A1A7); 天津市科研院所技术开发工作扶持经费项目 (FC2010001) 资助项目

作者简介: 于莉媛 (1980 -), 女, 吉林舒兰人, 主要从事半导体照明器件及应用的研究。

E-mail: yuliyuan1219@126.com

1 引 言

发光二极管 (Light emitting diodes, LED) 是一种重要的固态光源,具有低成本、寿命长等优点。其中, GaN 基材料的禁带宽度为 $0.7 \sim 6.2$ eV,其发光波长覆盖范围可以从 650 nm 到 200 nm,能够实现从红外光、红光、绿光、蓝光到紫外光等的全光谱发光,具有广阔的应用前景和巨大的市场潜力。

在 LED 内部产生的晶格空位、间隙原子和反位缺陷等内在点缺陷^[1],对材料和器件的电学性能和光学性能等都有很大的影响。电子束辐照是一种研究材料中点缺陷的重要手段^[2]。GaN 具有较强的抗辐照特性,因此通过工艺的改进和优化进一步提高 GaN 基发光器件的抗辐照特性成为一项重要的研究内容。国内外已经有关于电子束辐照 GaN 材料 LED 的相关实验报道^[3-5]。1999 年, Z. Q. Fang 等发现 1 MeV 电子辐照能够在 GaN 材料中诱生深能级 ($E_c \approx 0.18$ eV)。2002 年, Gelhausen 等^[6]也利用低能电子辐照研究掺 Mg 的 GaN 基 LED 的缺陷问题,提高了器件的发光效率,并对其机理进行了研究。2003 年, Sharshar 等^[7]在对 LED 的电子辐照和 Gamma 辐照效应的研究中指出,低剂量的电子辐照使 LED 归一化后的亮度由 16% 提高到 54% ,到高剂量时开始退化。

本文应用不同能量的电子束对 GaN 材料 LED 进行辐照,利用 PL 谱研究了 LED 的发光性能。将辐照能量与 GaN 材料 LED 光学性能的变化相结合,通过发光特性研究了不同能量的电子束辐照机理。

2 实 验

实验中选用的 GaN 材料结构如图 1 所示。实验样品分为 GaN 基 LED 外延片 1# 和 2#, 两种外延片结构相同,生长参数不同。

辐照实验采用 Dynamitron(地纳米)系列加速器,在标准大气压、普通空气氛围和常温的辐照氛围下进行不同能量和剂量的电子束辐照实验。对 1# 外延片进行 1.5 MeV 的电子束辐照,其辐射剂量为 10 kGy 和 100 kGy;对 2# 外延片分别进行 3 MeV 和 4.5 MeV 的辐照,并对辐照后的 LED 外延片进行室温 PL 谱测试。

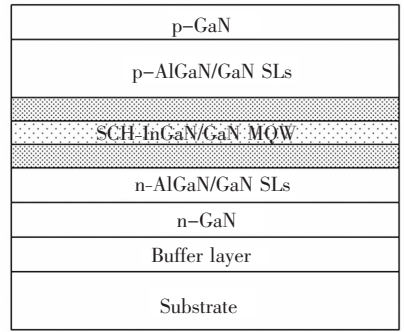


图 1 GaN 基 LED 材料结构示意图

Fig. 1 Structure of GaN-based LED material

3 结果与讨论

3.1 1.5 MeV 电子束辐照 LED 的 PL 谱测试

对 GaN 基 LED 外延片 1# 进行 1.5 MeV 的电子束辐照,辐照剂量分别为 10 kGy 和 100 kGy,并进行 PL 谱测试,获得 GaN 基 LED 的发光性能。

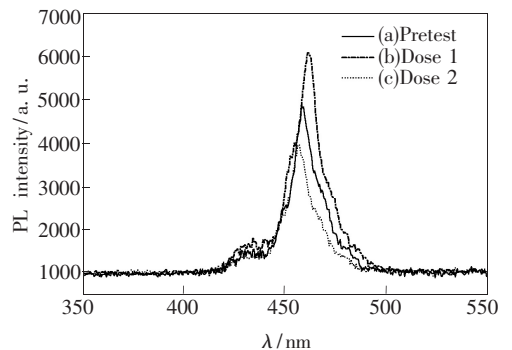


图 2 1.5 MeV 电子束辐照后的 GaN 基 LED 的 PL 谱
Fig. 2 PL spectra of 1.5 MeV irradiation on GaN-based LED

图 2 中曲线 (a) 是未经辐照的 1# GaN 外延片的 PL 谱,曲线 (b)、(c) 分别是经过 10 kGy 和 100 kGy 电子束辐照后的 PL 谱。由图中可以看出,1# 片主波长约为 460 nm,在 425 nm 处存在一个小发光峰。 425 nm 处的小发光峰是由导带下的深能级缺陷组到禁带中的能级跃迁产生的,主发光峰是由 InGaIn/GaN 的带隙跃迁 (430 nm 左右) 和量子阱斯托克效应产生的红移共同引起的。

当电子轰击半导体材料时,由于辐照电子与物质晶格的相互作用,形成了空穴间隙原子对,破坏了晶格的位置。这些空位将进一步与杂质或其他空位作用而形成更复杂的缺陷,进而在禁带中形成新的电子能级。电子、空穴俘获截面和能级密度的大小均对非平衡载流子的复合有贡献,从

而引起少子寿命和载流子浓度的降低。少子寿命 τ 与辐照剂量的关系可表示如下:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0} + k\phi_n, \quad (1)$$

其中, τ_0 为辐照前少子寿命, k 为辐照损伤系数, ϕ_n 为辐照剂量。在较低剂量下, 随着辐照剂量的增加, 少子寿命缩短, 扩散长度减小, 将会在 pn 结的附近产生一个窄的本征区。该本征区的产生将引起正向电流的显著提高, 同时引起发光强度的提高。在较高剂量下, 缺陷俘获的电子浓度 $n_i(t)$ 可表示如下:

$$n_i(t) = N_0 \exp\left(-\frac{T/\alpha_{rate}}{\tau_{ann}}\right) \exp\left(-\frac{t}{\tau_e}\right), \quad (2)$$

其中 N_0 为缺陷的本征浓度, T 为系统温度, α_{rate} 为升温速率常数, τ_{ann} 为载流子湮灭时间, τ_e 为载流子产生时间。由式(2)可以看出, 随着少子寿命的缩短, 缺陷俘获的少子浓度也有所降低, 复合几率下降, 引起发光强度降低。

从图 2 中还可以看出辐照对主波长的影响。经 10 kGy 和 100 kGy 电子束辐照后, 外延片的发光峰位置变化很小, 在小剂量下出现红移, 大剂量下出现蓝移。在小剂量下出现红移是由于当低剂量电子束辐照 LED 时, 在材料内部产生的深能级缺陷主要用来补偿化学掺杂的不足, 使费米能级位置远离导带底, 从而导致材料的禁带宽度降低; 当加大剂量时出现蓝移, 可以认为是由于辐照在材料内产生的大量缺陷使得 GaN 材料内原子间的相互作用力发生变化, 从而导致材料的禁带宽度增加。LED 发光峰的强度也发生了变化。在 10 kGy 剂量辐照下, LED 的发光强度增加约 25%; 而在 100 kGy 剂量辐照下, LED 的发光强度降低约 16%。

3.2 3 MeV 电子束辐照 LED 的 PL 谱测试

对 2# 外延片进行 PL 谱测试, 得到的曲线如图 3 所示。从图中可以看出, 在 456 nm 和 464 nm 处存在两个明显的发光峰。其中, 456 nm 处的发光峰可看作是深能级缺陷形成的, 464 nm 处的发光峰为 InGaN/GaN 的带隙跃迁(430 nm 左右)和量子阱斯托克效应产生的红移共同引起的。另外, 在 475 nm 处还存在一个较弱的发光峰, 是由 N 空位能级(3.36 eV)引起的。

如图 4 所示, 在经由低剂量 3 MeV 电子束辐照后, 2# 外延片的 PL 谱发生较大变化: 主波长蓝

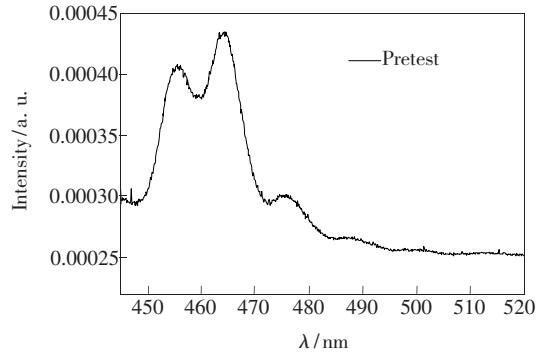


图 3 2# GaN 基 LED 外延片的 PL 谱
Fig. 3 PL spectrum of 2# GaN-based LED

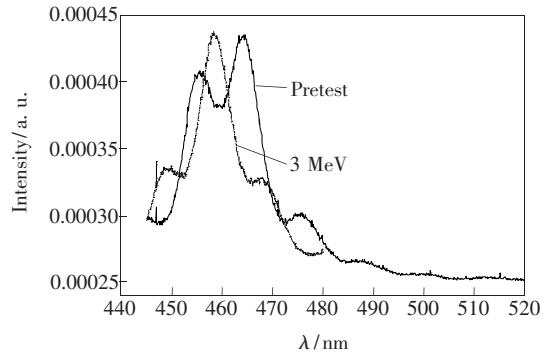


图 4 3 MeV 电子束辐照 GaN 基 LED 外延片的 PL 谱
Fig. 4 PL spectra of 3 MeV irradiation on GaN-based LED

移, 发光峰最高的位置由辐照前的 464 nm 变为辐照后的 459 nm; 次高峰减弱, 波长变为 450 nm 左右。波长蓝移可解释为 3 MeV 电子束对 GaN 材料 LED 辐照时, 由于辐照在材料内产生的大量缺陷会使得 GaN 材料内原子间的相互作用力发生变化, 从而导致材料的禁带宽度增加, 使主发光峰和次发光峰位置均发生变化。其中, 由于辐照后电子更多地被 N 空位能级俘获, 导致次发光峰减弱和 475 nm 处发光峰增强。3 MeV 电子束辐照使得 LED 的色纯度有所提高。

3.3 4.5 MeV 电子束辐照 LED 的 PL 谱测试

采用 4.5 MeV 电子辐照 2# GaN 基蓝光 LED 外延片, 选取低剂量的电子束辐照, 并与未辐照 LED 外延片的 PL 谱相比较, 如图 5 所示。

由图 5 可知, 经 4.5 MeV 电子束辐照后, LED 的发光强度有所降低。电子入射到物体中, 随透射深度的增加, 能量沉积到辐照物体内部。总的能量损失为:

$$D = D_1 + D_2, \quad (3)$$

D_1 表示碰撞过程导致的能量损失, D_2 表示韧致辐射导致的能量损失。

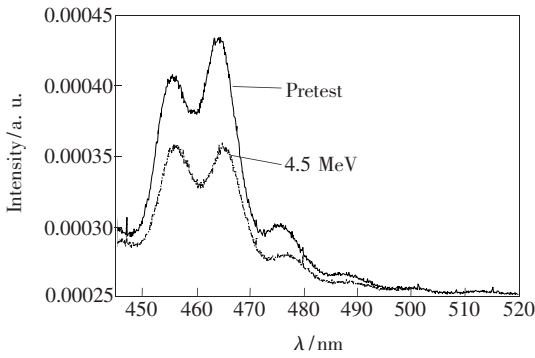


图 5 4.5 MeV 电子束辐照 GaN 基 LED 外延片的 PL 谱
Fig. 5 PL spectra of 4.5 MeV irradiation on GaN-based LED

$$-\frac{1}{\rho} \left(\frac{dD_1}{ds} \right) = \alpha \frac{Z^*}{A^*} \left[\ln \frac{\tau^2 (\tau + 2)}{2(I/mc^2)^2} + 1 - \beta^2 + \frac{\tau^2/8 - (2\tau + 1)\ln 2}{(\tau + 1)^2} \right], \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{2\pi N_A r_0^2 mc^2}{\beta^2}, \quad \beta = \frac{v}{c}, \quad (5)$$

$$\tau = \frac{E}{mc^2}, \quad (6)$$

ρ 为物质密度, m 为电子静止质量, v 为电子速度, c 为光速, r_0 为最小轨道半径, N_A 为 Avogadro 常数, Z^* 为等效原子数, A^* 为等效原子量。

$$-\frac{1}{\rho} \left(\frac{dD_2}{ds} \right) = \frac{N_A mc (\tau + 1)}{A} \sigma, \quad (7)$$

其中

$$\sigma = 4\alpha_0 \left[\ln(183Z^{*-1/3}) + \frac{1}{18} \right] Z^{*2} r_0^2, \quad (8)$$

I 为原子的平均电离能, 与原子序数有关; E 为电子动能, α_0 为精细结构常数。

由以上公式可以推出, 在单一介质中同一位置处的能量损失随入射电子能量的增强而降低。能量较小时, 能量损失在介质内部达到峰值; 随着能量的增强, 峰值逐渐变小, 并向下一层介质迁移。由于 LED 外延片为多层介质结构, 每一层的能量损失规律与单层介质相同, 但在介质界面处, 由于物质阻止本领的不同, 会在界面处留下大量缺陷, 界面态缺陷的存在将会降低俘获载流子截面, 发光也随之减弱。

4 结 论

采用不同剂量的电子束对 LED 外延片进行辐照, 对辐照前后 LED 的 PL 谱进行了比较。实验结果表明: 采用低能量、低剂量电子束辐照时, 由于电子束辐照引起的窄的本征区的产生, 导致正向电流显著提高, LED 的发光强度提高; 在增加剂量时, 缺陷俘获少子浓度降低, 会引起 LED 的发光强度降低。在 3 MeV 电子束辐照下, 原来色纯度不高的 LED 会在一定程度上变好; 而在更高能量辐照下, 由于多层介质结构的存在, 将在材料界面处引入大量缺陷, 引起器件发光减弱。实验结果对 LED 的电子束辐照改性实验具有一定的指导作用。

参 考 文 献:

- [1] Salvo C J. Solide state light valve [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1971, 18(9):748-755.
- [2] Zhao G C, Li P X, Hao Y. The effect of etching time on the quality of GaN grown on sapphire substrate [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2010, 31(5):624-627 (in Chinese).
- [3] Chernyak L, Osinsky A, Fuflyigin V, et al. Electron beam-induced increase of electron diffusion length in p-type GaN and AlGaIn/GaN superlattices [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, 77(6):875-877.
- [4] Morita D, Sano M, Yamamoto M, et al. Over 200 mW on 365 nm ultraviolet light emitting diode of GaN-free structure [J]. *Physical Status Solid (a): Appl. Research*, 2003, 200(1):114-117.
- [5] Everhart T E, Hoff P H. Determination of kilo volt electron energy dissipation vs. penetration distance in solid materials [J]. *J. Appl. Phys.*, 1971, 42(13):5837-5846.
- [6] Gelhausen O, Klein H N, Phillips M R, et al. Influence of low-energy electron beam irradiation on defects in activated Mg-doped GaN [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, 81(20):3747-3749.
- [7] Xiao Y P, Mo C L, Qiu C, et al. The aging characteristics of GaN-based blue LED on Si substrate [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2010, 31(3):364-368 (in Chinese).