

静电放电对 GaN 基功率型 LED 老化特性的影响

李伟国 崔碧峰 郭伟玲 崔德胜 徐昕伟

(北京工业大学光电子技术省部共建教育部重点实验室, 北京 100124)

摘要 对 GaN 基蓝光功率型 LED 在老化前和老化期间施加反向人体模式静电放电 (ESD), 并对静电打击前后及老化前后的 LED 光学电学参数进行分析。实验结果及理论分析表明, ESD 使 LED 芯片有源层及限制层中产生缺陷, 最终导致电学特性及光学特性的变化。ESD 给 LED 带来的损伤可在老化前期过程中被局部恢复, 但随着老化时间推移, 电参数漂移程度及光衰幅度不断增大, 而老化过程中 LED 对 ESD 的敏感度增加, 使 LED 抗 ESD 能力减弱。

关键词 光学器件; LED; 氮化镓; 静电放电; 电流-电压特性

中图分类号 TN364⁺.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0823006

Effect of Electrostatic-Discharge on the Aging Characteristics of GaN Based Power LED

Li Weiguo Cui Bifeng Guo Weiling Cui Desheng Xu Xinwei

(Key Laboratory of Opto-Electronics Technology, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract Blue GaN-based power LEDs are biased by negative human body mode electrostatic-discharge (ESD) before and during the aging time, and the characteristics of LEDs are analyzed before and after aging experiment and ESD stress. It is found that the generation of defects in active region and cladding layers after ESD stress could finally lead to degradation of LEDs. The defects induced by ESD could be restored partly in the early aging. However, these defects can cause parameters drift more seriously. Moreover, LEDs could be more sensitive to ESD stress and have lower antistatic ability during aging.

Key words optical devices; LED; gallium nitride; electrostatic discharge; current-voltage characteristics

OCIS codes 230.3670; 160.2540; 010.1690

1 引言

氮化镓 (GaN) 基发光二极管 (LED) 是半导体照明的核心器件, 随着技术的发展, 近年来在光通量、发光效率和寿命等方面都有了极大提高。与传统光源相比, LED 具有长寿命、低功耗、无污染和辐射等优点, 被认为是 21 世纪最有前途的绿色光源^[1~3]。这对 LED 的可靠性提出了更高的要求。LED 的理论寿命可长达 10^5 h^[4], 但这是由老化实验推算的, 由于实际应用环境和理想实验环境存在一定差异, 实际寿命和理论推算肯定存在一些差异。静电放电

(ESD) 的本质就是电荷的快速中和。我们知道所有的物质都由原子构成, 原子中有电子和质子。当物质获得或失去电子时, 它将失去电平衡而变成带负电或正电, 正电荷或负电荷在材料表面上积累就会使物体带上静电, 静电的电压可达几千至数万伏。如果存在放电通道, 它将产生瞬间大电流, 给电子元器件带来损伤 (如开路、短路、参数漂移、功能不符合要求等)。GaN 基功率型 LED 和其他半导体器件一样, 不可避免地在生产、封装、传递、运输过程中会受到 ESD 损伤。特别是蓝宝石衬底 GaN 基 LED,

收稿日期: 2012-02-15; **收到修改稿日期**: 2012-04-20

基金项目: 国家 863 计划 (2009AA03A1A3) 和国家科技支撑计划 (2011BAE01B14) 资助课题。

作者简介: 李伟国 (1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事半导体光电子器件方面的研究。E-mail: cds1210@163.com

导师简介: 崔碧峰 (1972—), 女, 博士, 副教授, 主要从事半导体光电子器件方面的研究。E-mail: cbf@bjut.edu.cn

(通信联系人)

对ESD的敏感度比碳化硅(SiC)衬底更高^[5],ESD已成为GaN基功率型LED可靠性设计中需要重点考虑的因素之一。目前,国内外对温度、电流和湿度等方面对LED老化特性影响的内在机制几乎都得到了广泛的研究^[6~8];而ESD方面的研究却只停留在研究如何改进器件ESD特性^[7~12]层面上,对老化过程中ESD对老化特性的影响的分析则几乎没有,但这种情况下的一些老化性质的研究对器件的改进有很大帮助^[13]。

人体模型静电放电中(HBM ESD)静电的来源是带电人体,这个测试模型描绘站立个人从指尖放电到器件的导体引脚。它的模型是:测试由一个100 pF电容器通过一个开关元件和1500 Ω 系列电阻器放电到器件上。放电本身是有2~10 ns上升时间的2次幂波形和一个近似150 ns脉冲,1500 Ω 系列电阻器意味着这个模型近似是电流源,而且所有器件应该被认为HBM敏感。为了研究ESD对GaN基功率型LED的老化特性的影响,本文重点研究了HBM ESD打击前后及老化前后LED样品电学及光学特性在老化过程中的变化,并对产生的变化进行了理论分析,对实验现象给出了合理的物理解释。

2 实 验

本实验样品为自制InGaN/GaN多量子阱蓝光LED,尺寸为1 mm \times 1 mm,经封装后制成样品。实验中把样品分成三组,按三种方案进行老化:方案1(G1),在老化前进行ESD打击,ESD打击后进行700 h老化;方案2(G2),先进行电应力老化,老化300 h后进行ESD打击,之后继续老化400 h;方案3(G3),作为对比实验,直接进行700 h电应力老化实验。其中ESD静电打击使用人体模式,电压为反向2000 V,使用设备为美国的Model 910 Electrostatic Discharge Simulator。老化时使用的恒流源为高精度恒流源,电流应力为900 mA,老化温度为环境温度25 $^{\circ}$ C。老化前和老化期间分别对样品进行电学和光学参数测试,测试设备为Keithley仪器公司4200 Semiconductor Characterization System和浙大三色的LED光电色热测试系统。

3 结果与讨论

图1是三组蓝光LED原始和经过ESD静电及

电应力老化后的I-V特性曲线。由图1可以看出,老化700 h后,三组GaN基功率LED的I-V特性曲线都有一定变化,但与G3方式相比,按G1及G2方式老化后LED的I-V特性曲线变化较大,电参数漂移比较明显,这是因为经过ESD打击,GaN基功率型LED在反向偏置的高电场下,流过LED的电流形成局部高温,引起欧姆接触层杂质的微扩散^[14]。杂质的微扩散造成了杂质的重新分布,从而引发局部漏电现象。

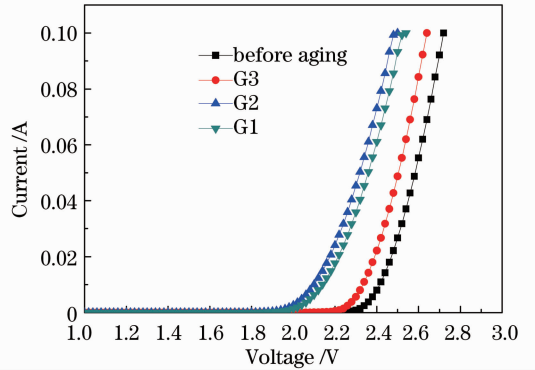


图1 老化700 h后I-V曲线变化图

Fig. 1 I-V characteristics for 3 groups after aging 700 h

反向偏置为-5 V时反向电流随老化时间的变化关系如图2所示。老化初始时刻,由于G1组LED经过-2000 V ESD打击,反向电流明显大于其他两组,这主要是因为LED有源区产生了缺陷,而且在高电场下,有源层中的载流子可以获得足够的能量发生碰撞电离并被加速,高速的载流子与晶格碰撞,可能在限制层中产生深能级态,空间电荷区会产生点缺陷(空位和间隙)^[15],同时高能量的载流子也会对有源区产生缺陷,这样缺陷进一步被扩大^[16];而在反向偏置下,由于限制层中存在深能级缺陷,量子阱中的电子不必越过能垒,而是直接隧穿到限制层中和深能级复合,所以G1的初始反向电流较大。这与G2组LED在300 h的反向漏电流增加这一现象正好吻合。有报道指出^[17],GaN基白光功率型LED芯片在晶体生长时,不可避免地会在有源层中引入一些螺旋位错(TD)。当LED受到ESD冲击时,在位错的附近沿有源层向限制层方向产生点缺陷。有源层和限制层中点缺陷的引入,会在有源层的量子阱能带结构引入深能级,使原来从导带到价带跃迁产生辐射复合的一部分电子被缺陷引入的深能级俘获,产生了非辐射复合。点缺陷引入的深能级,宏观上相当于镶入了额外的电流通路,导致

LED 反向隧穿电流增大,这可以由图 2 中 G1 及 G2 曲线得到验证。

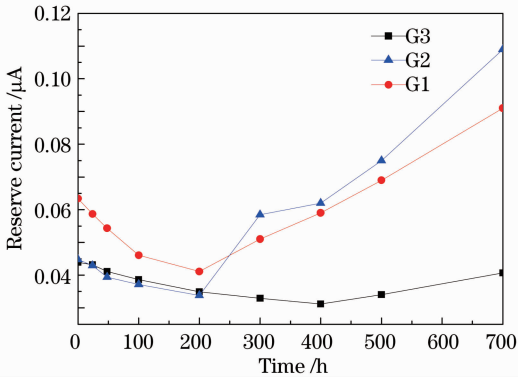


图 2 不同老化时间下的反向偏置 -5 V 电流变化

Fig. 2 Currents at the voltage of -5 V with different aging times

根据 pn 理论,反向偏置时,二极管的电流主要由隧穿电流组成。而对于 GaN 基 LED,隧穿电流可表示为^[18]

$$I = BN_T \exp \left[-\frac{4V \sqrt{(m^* \epsilon) / N}}{3h} \right], \quad (1)$$

式中 B 为常数, h 为普朗克常数, m^* 为电子有效质量, ϵ 为介电常数, N_T 为半导体界面或体内的缺陷态密度, N 为掺杂浓度。其中影响隧穿电流的主要是 N_T 和 N 的大小,在老化前期,芯片内部产生的热量会使 Mg-H 络合物分解^[19],掺杂浓度 N 会增大,而且老化前期芯片内部产生的热量将使芯片经历一个类似于热退火的过程,使器件内的缺陷减小,即 N_T 减小。即老化过程中前 200 h 内,缺陷态密度 N_T 会减少,并且 N_T 变小的幅度大于 N 变大的幅度,所以隧穿电流减小。而当老化时间超过一定时间后,在电应力作用下,会产生新的缺陷并且逐渐增多,所以隧穿电流将增大。

由图 2 中 G1 曲线可以看出,对于施加了 ESD 打击的芯片,在老化前期也会经历这个退火过程,ESD 打击产生的缺陷在这段类似退火作用机理的老化过程中得到局部消除,反向漏电流有所下降,但在老化后期,由于长期电应力作用,产生的新缺陷的作用愈加明显,反向漏电流也随之上升。

图 3 为三种老化方案光通量随时间变化关系图,由图可以看出光通量的下降并不是从老化起始点开始的,而是经过一段老化时间后,光通量才开始衰减。这主要是因为老化前期,器件内的 Mg-H 络合物分解,使器件中 p 型掺杂浓度上升,由电注入的载流子复合几率增加,使光通量略有增加;从图 3 中

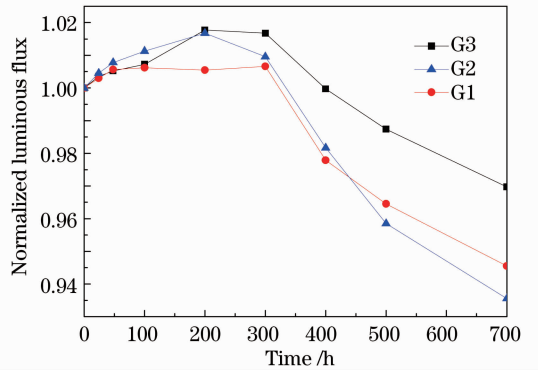


图 3 归一化光通量随老化时间的变化

Fig. 3 Normalized luminous flux of LEDs as a function of aging time

还可以看出,经过 700 h 老化,ESD 打击的 G1 和 G2 样品光衰比 G3 样品大,这说明 ESD 打击影响 GaN 基 LED 的老化过程,加快 LED 退化的速度。

结合图 1~3,样品 G1 和 G2 相比,样品 G2 的正向 $I-V$ 特性、反向电流和光通量衰减老化时间变化的幅度都比样品 G1 大,这是因为 GaN 基 LED 的老化过程中金属杂质发生了移动,并沿着螺旋位错向体内扩散。还有研究表明^[5],LED 老化过程中 p 型 GaN 层中的 Mg 原子会向有源区移动,这种 Mg 原子的移动会降低器件的抗静电能力。由此可以推断,随着老化时间的推移,LED 的抗 ESD 能力减弱,在老化 300 h 后受 ESD 打击这组样品老化过程的电、光特性参数漂移较大,这与之前的解释完全相符。

由以上讨论可知,静电冲击对 LED 电参数和光学参数产生影响的主要原因是杂质的微扩散和点缺陷的形成,要从根源上避免和减轻微扩散及缺陷对 LED 电参数和光学参数的影响,必须从 GaN LED 芯片外延着手,尽量在有源区外延严格控制缺陷的产生,尽可能减小螺旋位错的密度,从根本上改善外延质量,但这对外延设备及处延环境(如温度、压力、气源流速等)提出的要求显然过于“苛刻”。从现有理论上讲,增加 LED 内部的附加电容,引入电流扩展层,也有利于加强 GaN 基 LED 芯片的抗 ESD 能力,减轻静电引起的微扩散及缺陷对 LED 电参数和光学参数的影响。若在 LED 芯片外延 n-GaN 层之后,有源层量子阱生长之前,生长一层 Si-delta 掺杂层(一种 Si 杂质分布服从狄拉克 δ 分布的掺杂层),则可以增加 LED 内部的附加电容,并提高 LED 的电流扩展能力,达到增强 LED 抗 ESD 冲击能力的目的。

4 结 论

通过三种老化方案实验发现,ESD对GaN基功率LED老化过程 $I-V$ 曲线、反向漏电流、光通量衰减都有较大的影响,其主要原因是经过ESD打击后,GaN基LED有源层产生了缺陷。若在n-GaN层和有源层量子阱层之间加一层Si-delta掺杂层,则可以减轻LED电参数和光学参数受ESD打击的影响。在老化前期,ESD打击产生的缺陷因这段类似退火机理的作用得到消除,所以这个阶段的反向漏电减小;由于老化前期器件内的Mg-H络合物分解,使器件中p型掺杂浓度上升,光通量在这段时间略有增加,而在老化后期,ESD打击加快了器件的光通量衰减。实验还发现,GaN基功率型LED在老化过程中抗ESD能力有所减弱,即随着时间推移,对ESD的敏感度增加。总之,ESD使LED芯片有源层及限制层中产生缺陷,导致电学特性及光学特性的变化,从而加速了LED的老化;但ESD给LED带来的损伤可在老化前期类似退火的过程中被恢复,老化过程会降低器件的抗ESD能力。

参 考 文 献

- Zhou Zhou, Feng Shiwei, Zhang Guangchen *et al.*. The aging characteristics of high-power GaN-based white light-emitting diodes[J]. *Chinese J. Luminescence*, 2011, **32**(10): 1046~1050
周舟, 冯世维, 张光沉等. GaN基大功率白光LED的高温老化特性[J]. *发光学报*, 2011, **32**(10): 1046~1050
- Wu Haibin, Wang Changling. Experimental research on influence of packing materials of white LED on its luminous decay[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8): 1091~1094
吴海彬, 王昌铃. 白光LED封装材料对其光衰影响的实验研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(8): 1091~1094
- Su Liwei, You Da, Cheng Haiying *et al.*. Characterization of high-power GaN-based green LED on Si substrate [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 1066~1069
苏丽伟, 游达, 程海英等. Si衬底功率型GaN基绿光LED性能[J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 1066~1069
- M. Meneghini, L.-R. Trevisanello, G. Meneghesso *et al.*. A review on the reliability of GaN-based LEDs[J]. *IEEE Trans. Device and Materials Reliability*, 2008, **8**(2): 323~330
- M. Meneghini, A. Tazzoli, G. Mura *et al.*. A review on the physical mechanisms that limit the reliability of GaN-based LEDs [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2010, **57**(1): 108~118
- S. Buso, G. Spiazzi, M. Meneghini *et al.*. Performance

- degradation of high brightness light emitting diodes under DC and pulsed bias[J]. *IEEE Trans. Device and Materials Reliability*, 2008, **8**(2): 312~322
- M. Meneghini, L. Rigutti, L. Trevisanello *et al.*. A model for the thermal degradation of metal/(p-GaN) interface in GaN-based LEDs[J]. *J. Appl. Phys.*, 2008, **103**(6): 7031~7037
- T. Yu, S. Shang, Z. Chen *et al.*. Luminescence degradation of InGaN/GaN violet LEDs [J]. *J. Lumin.*, 2007, **122-123**: 696~699
- C. H. Jang, J. K. Sheu, S. J. Chang *et al.*. Effect of growth pressure of undoped GaN layer on the ESD characteristics of GaN-based LEDs grown on patterned sapphire [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2011, **23**(14): 968~970
- P. C. Tsai, W. R. Chen, Y. K. Sua. Enhanced ESD properties of GaN-based light-emitting diodes with various MOS capacitor designs[J]. *Superlattices and Microstructures*, 2010, **48**(1): 23~30
- C. H. Jang, J. K. Sheu, C. M. Tsai *et al.*. Effect of thickness of the p-AlGaIn electron blocking layer on the improvement of ESD characteristics in GaN-based LEDs [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(13): 1142~1144
- C. M. Tsai, J. K. Sheu, P. T. Wang *et al.*. High efficiency and improved ESD characteristics of GaN-based LEDs with naturally textured surface grown by MOCVD[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(11): 1213~1215
- Le Shuping, Yi Jianglin, Xiao Huirong *et al.*. Influence of ESD on aging of GaN/Al₂O₃ white LEDs[J]. *J. Functional Materials and Devices*, 2008, **14**(3): 712~716
乐淑萍, 易江林, 肖慧荣等. 蓝宝石衬底GaN基白光LED静电老化特性[J]. *功能材料与器件学报*, 2008, **14**(3): 712~716
- Gao Guangbo, Li Xuexin. Reliability Physics of Semiconductor Device[M]. Beijing: Science Press, 1987. 458~465
高光勃, 李学信. 半导体器件可靠性物理[M]. 北京: 科学出版社, 1987. 458~465
- X. A. Cao, P. M. Sandvik, S. F. LeBoeuf *et al.*. Defect generation in InGaIn GaN light-emitting diodes under forward and reverse electrical stresses[J]. *Microelectronics Reliability*, 2003, **43**(12): 1987~1991
- Cui Desheng, Guo Weiling, Cui Bifeng *et al.*. Effects of human-body-mode electrostatic discharge on GaN-based power light-emitting diode[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0323004
崔德胜, 郭伟玲, 崔碧峰等. 人体模式静电放电对GaN基大功率发光二极管特性的影响[J]. *光学学报*, 2011, **31**(3): 0323004
- Matteo Meneghini, Augusto Tazzoli, Enrico Ranzato. A study of the failure of GaN-based LEDs submitted to reverse-bias stress and ESD events [C]. 2010 *IEEE International Reliability Physics Symposium*, 2010, 522~527
- A. G. Milnes, D. L. Feucht. Heterojunctions and Metal-Semiconductor Junctions [M]. New York: Academic, 1973. 42~43
- N. Narendran, Y. Gu. Life of LED-based white light sources [J]. *J. Display Technol.*, 2005, **1**(1): 167~171

栏目编辑: 韩峰