

人体模式静电放电对 GaN 基大功率 发光二极管特性的影响

崔德胜 郭伟玲 崔碧峰 丁天平 尹 飞 闫薇薇

(光电子技术省部共建教育部重点实验室, 北京 100124)

摘要 对 GaN 基大功率蓝光发光二极管(LED)分别施加了-200, -400, -600, -800, -1100 和 -1500 V 的反向人体模式静电打击,每次静电打击后,测量样品电学参数和光学参数的变化,研究了静电对 LED 可靠性的影响,并从理论上分析了相关衰减机理。结果表明,在-200, -400, -600 和 -800 V 的打击后,有明显的软击穿,这是因为在有源区和限制层中产生了缺陷;在-1100 V 和 -1500 V 的打击后,漏电很大并且光通量衰减为打击前的 50%,这是因为大的静电使得有源区产生熔融细丝,导致小电流时 LED 不发光,大电流时光通量明显下降,致使 LED 失效。同时还提出了一种简单有效的抗静电保护电路。

关键词 光学器件;失效机理;静电放电;发光二极管; I - V 特性

中图分类号 TN364⁺.2 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0323004

Effects of Human-Body-Mode Electrostatic-Discharge on GaN-Based Power Light-Emitting Diode

Cui Desheng Guo Weiling Cui Bifeng Ding Tianping Yin Fei Yan Weiwei

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

Abstract High-power blue light-emitting diodes were biased by negative Human-Body-Mode electrostatic discharge (ESD) with -200, -400, -600, -800, -1100 and -1500 V. The electrical and optical parameters of the LED were measured before and after ESD stressing. The failure mechanisms resulted in by ESD stress were analysed after each ESD stress. The LED had evident soft breakdown due to the generation of defect in active region and cladding layers after ESD stressing at -200, -400, -600 and -800 V. However, when the device was biased to -1100 V and -1500 V, high leakage current of the LED appears and 50% degradation of light output than before stressing. The reason is the generation of melting thread in active region that made LED cannot emit light. In addition, a simple and effective protection circuit for ESD is proposed.

Key words optical devices; degradation mechanism; electrostatic discharge(ESD); light-emitting diode(LED); I - V characteristics

OCIS codes 230.3670; 160.2100; 150.4620

1 引 言

近年来,GaN 基白光发光二极管(LED)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 具有体积小、重量轻、耗电量小、平面化、响应速度快、耐震、亮度高、没有污染和辐射

等优点,并且白光 LED 最接近日光,更能较好地反映照射物体的真实颜色,所以白光 LED 照明最有潜力,被认为是 21 世纪最有价值的新光源,LED 照明取代传统照明成为人类照明的主要方式,将是大势所趋^[1,2]。理论计算 LED 的寿命可长达 10^5 h^[3],

收稿日期:2010-08-06;收到修改稿日期:2010-11-01

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:崔德胜(1986—),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:郭伟玲(1966—),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: guoweiling@bjut.edu.cn

甚至更长,但由于实际应用中的各种外界因素的影响,实际使用寿命不会达到预期值,其中静电就是影响因素之一。目前,大多数白光 LED 是在蓝光 LED 上涂荧光粉制成的^[4],而蓝光 LED 是在蓝宝石衬底上生长的,因此有很高的位错密度,所以在器件的生产、封装等操作中非常容易受到静电的影响^[5]。很多文献都是在 LED 老化后研究其有源区中缺陷的产生^[6~8]、热阻^[9]、荧光粉和封装材料的退化等^[10~12],而研究静电放电(ESD)对 LED 影响的却很少。本文对 GaN 基蓝光 LED 直接施加静电,研究了施加静电后 LED 的电学和光学参数的变化。

2 实 验

实验所用的样品为自制的大功率蓝光 LED,静电测试采用人体模式的静电。对样品进行反向连续打击,测试设备为美国的 Model 910 Electrostatic Discharge Simulator。因为人体所带静电通常小于 2000 V,而当放电电压小于 3500 V 时,人体是没有感觉的,但这对电子元件可能就会造成毁坏,所以实验中对 LED 施加的最大静电电压不超过 2000 V,研究在一般的人体模型放电情况下静电对 LED 特性的影响。反向静电打击分别为 -200, -400, -600, -800, -1100 和 -1500 V,每次静电打击后对样品进行电学和光学参数测试,测试设备分别为 Keithley 仪器公司的 4200 Semiconductor Characterization System 和浙江大学提供的三色 LED 光电色热测试系统。本文中定义 LED 的光通量衰减为原来的 50% 时为 LED 的失效标准^[13]。

3 结果与讨论

图 1 是每次经静电打击后测得的正向 $I-V$ 特性曲线,由图 1 可知,施加反向静电 -200, -400, -600 和 -800 V 后, $I-V$ 特性曲线变化不是很明显,但将其局部放大后可以观察到 LED 已经出现软击穿;图 2 是每次经静电打击后测得的反向 $I-V$ 特性曲线,经 -400 V 静电打击后,LED 有明显漏电现象。

当进行 -200, -400, -600 和 -800 V 的静电打击后,可以看到虽然有软击穿出现并且漏电流明显增大,但 LED 的光通量没有明显的变化,所以可以认为并没有发生热模式击穿,而是在器件内部产生了缺陷。在反向偏置的高电场下,载流子可以获得足够高的能量发生碰撞电离并被加速,高速的载

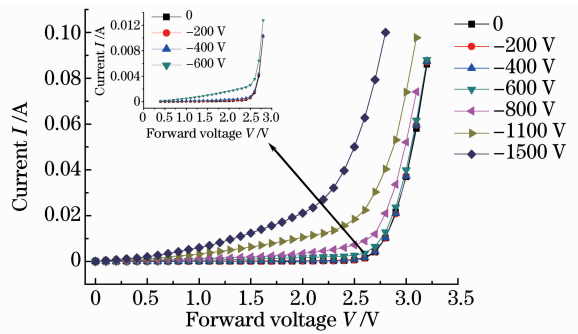


图 1 LED 正向 $I-V$ 特性曲线

Fig. 1 Forward $I-V$ characteristics of the LED

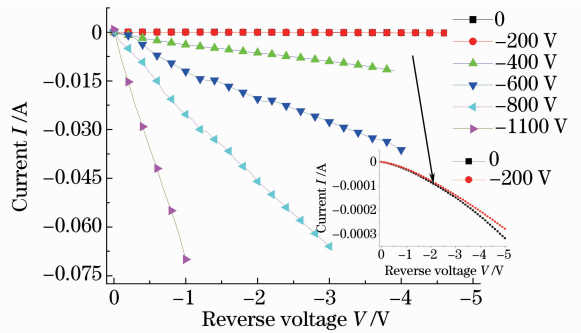


图 2 反向 $I-V$ 特性

Fig. 2 Reverse $I-V$ characteristics of the LED

流子会与晶格碰撞,这可能会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)^[14],同时高能量的载流子也会对有源区产生缺陷,通常认为缺陷产生于 InGaN 层,因为 In-N 的键合能很小。GaN 材料在生长时就存在大量的缺陷密度 ($10^8 \sim 2 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$)^[15,16],所以在高电场下,缺陷也会进一步扩大。

在图 1 中, $I-V$ 曲线中间某部分满足 $An = Bn^2$, A 为 SRH 复合速率, B 为辐射复合速率, n 为电子浓度,此时电流密度可近似为^[17]

$$J = nql\sigma v N_T,$$

式中 q 为电子电量, l 为有源区厚度, σ 为俘获截面, v 为电子运动速度, N_T 为缺陷密度。 N_T 增大时,电流会增大,这与 LED 出现软击穿的变化一致,说明在有源区产生了缺陷。有源区中缺陷的复合机理如图 3 所示。

在正向偏置下,载流子的复合由两部分组成,一部分电子直接和限制层中的深能级缺陷直接复合,剩余的电子注入到有源区,被有源区中的缺陷俘获,发生非辐射复合,如图 3(a) 所示,所以在很小的偏置电压下,会出现软击穿现象。

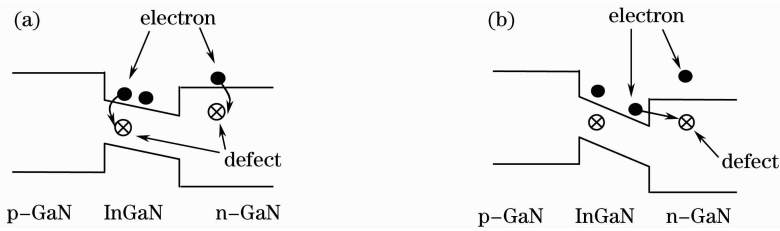


图 3 (a)正向偏置载流子复合示意图,(b)反向偏置载流子复合示意图

Fig. 3 (a) Carrier combination principle under forward bias using band structure, (b) carrier combination principle under reverse bias using band structure

图 3(b)表明,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量很大的势垒,而是直接隧穿到限制层中和深能级复合,所以在反向偏置下可以看到有明显的漏电。当正向电流很大时,载流子数量足够多,完全可以使限制层和有源区中的缺陷饱和,剩下的大量载流子被注入到有源区发生辐射复合,所以从图 2 可以看到在大电流的情况下,LED 的光通量并没有明显的变化。

图 4 是 LED 的光通量 ϕ 随 ESD 电压的变化,当对 LED 施加 -1100 V 和 -1500 V 的静电打击后,在工作电流 350 mA 下测试时,LED 的光通量有明显的衰减,并且在 -1500 V 的打击后,光通量已经不足为原来的一半,所以认为此时热模式击穿已成为 LED 衰减的主要原因。

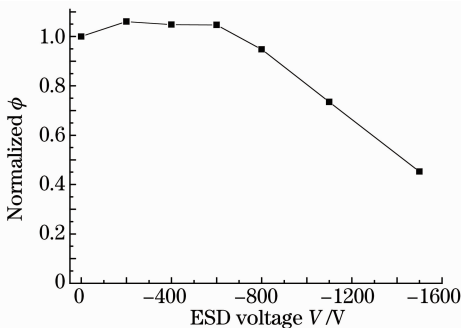


图 4 光通量随 ESD 电压的变化

Fig. 4 Luminous flux of LED as a function of ESD voltage

高光渤等^[18]指出,静电会引起 p-n 结局部反向击穿,强电流不再均匀流过结区而是集中于一个小区域,形成了细丝电流,使结区局部升温产生热斑,结温升高又会增加本征载流子浓度,这样就在反向电流和结温之间形成了正反馈,并且被压缩的细丝电流形成一个微等离子区。细丝中的电流密度非常高,当达到材料的熔化温度时,便会在结区形成非常细的低阻的熔融通道。从图 1 可以看到,当经过 -1500 V 的静电打击后,在低电压范围内 $I-V$ 特性

曲线几乎是斜线,表明电流全部流过低阻的熔融通道,用小电流测试时,在很大的电流范围内 LED 不发光;并且反向 $I-V$ 特性曲线也是斜线,反向电流达到几十毫安,这都能说明 LED 此时就是一个电阻。当测试电流很大时,LED 会发出微弱的光,这是因为低阻的细丝通道电流被饱和,只有其他结区的局部发光。可以预测静电电压更大时,熔融通道将更粗更多,器件将会完全失效。

图 5 是最终失效的 LED 的扫描电子显微镜 (SEM) 照片,样品表面已经出现了较大的熔融区域,此区域便是上述的低阻熔融通道,贯穿于整个器件中。

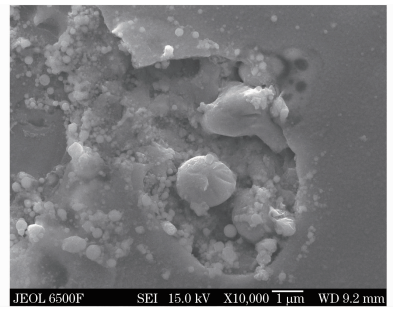


图 5 样品经 -1500 V 静电打击后的 SEM 照片

Fig. 5 Scanning electron microscope(SEM) image of the damaged region by -1500 V electrostatic discharge

GaN 基 LED 对静电如此敏感,所以在实际应用中通常要对 LED 加保护电路。最实用和有效的方法就是在倒装 LED 的 Si sub-mount 上集成两个背靠背的齐纳二极管,如图 6 所示。

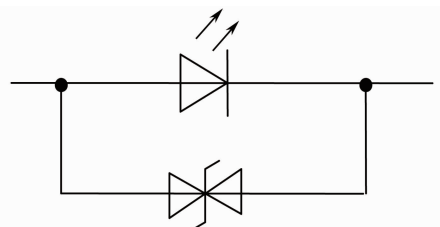


图 6 LED 抗静电保护电路

Fig. 6 ESD protection circuit of LED

4 结 论

对 GaN 基大功率蓝光 LED 施加了 -200, -400, -600, -800, -1100 和 -1500 V 的反向人体模式静电打击,每次静电打击后对样品进行电学参数和光学参数测试。在 -200, -400, -600 和 -800 V 的打击后,有明显的软击穿,说明有源区和限制层中产生了缺陷,载流子的复合由两部分组成:电子与限制层中深能级缺陷直接复合和在有源区的非辐射复合;在 -1100 V 和 -1500 V 的打击后,漏电很大并且光通量衰减很大,可以认为 LED 失效,这是因为施加很大的静电时有源区产生熔融细丝,所以在小电流测试时 LED 不发光,大电流时,低阻的细丝通道电流被饱和,只有局部结区发光,反向偏置下,电流全部流过细丝通道,有很大的漏电。由于 GaN 基 LED 对静电敏感,另外还提出了一种由两个背靠背的齐纳二极管组成的抗静电保护电路。

致谢 感谢北京市光电子技术实验室的邹德恕研究员及田亮在理论和实验上给予的帮助。

参 考 文 献

- 1 Wang Xiaoming, Guo Weiling, Gao Guo *et al.*. Gate of dawn-LED will illuminate the future[J]. *Advanced Display*, 2005, (07): 15~16
王晓明,郭伟玲,高国等. LED——新一代照明光[J]. *现代显示*, 2005, (07): 15~16
- 2 Le Shuping, Yi Jianglin, Xiao Huirong. Influence of ESD on aging of GaN/Al₂O₃ white LEDs[J]. *Journal of Functional Materials and Devices*, 2008, **14**(3): 712~713
乐淑萍,易江林,肖慧荣. 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): 712~713
- 3 M. Meneghini, L. R. Trevisanello, G. Meneghesso *et al.*. A review on the reliability of GaN-based LEDs[J]. *IEEE Trans. Device Mater. Reliab.*, 2008, **8**(2): 323~330
- 4 Bai Shengmao, Wang Jing, Miao Hongli *et al.*. Luminescence properties of the Y_{3-x-y}Pr_xGd_yAl₅O₁₂:Ce³⁺ Phosphors for white light emitting diodes[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1402~1405
白生茂,王晶,苗洪利等. 用于白光 LED 的 Y_{3-x-y}Pr_xGd_yAl₅O₁₂:Ce³⁺ 荧光粉发光特性研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1402~1405
- 5 D. A. Steigerwald, J. C. Bhat, D. Collins *et al.*. Illumination

- with solid state lighting technology[J]. *IEEE J. Select. Topics Quant. Electron.*, 2002, **8**(2): 313~314
- 6 O. Pursiainen, N. Linder, A. Jaeger *et al.*. Identification of aging mechanisms in the optical and electrical characteristics of light-emitting diodes[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **79**(18): 2895~2896
- 7 P. Altieri, A. Jaeger, R. Windisch *et al.*. Internal quantum efficiency of high-brightness AlGaInP light-emitting devices[J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, **98**(086101): 1~3
- 8 Y. M. Wang, C. B. Xiong, G. X. Wang *et al.*. Study on aging characterization of 1 W epitaxy on Si substrate blue LED based on different substrates[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1749~1753
汪延明,熊传兵,王光绪等. 不同基板 1 W 硅衬底蓝光 LED 老化性能研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1749~1753
- 9 L. Q. Yang, J. Z. Hu, L. Kim *et al.*. Variation of thermal resistance with input power in LEDs[J]. *Phys. Status Solidi C*, 2006, **3**(6): 2187~2190
- 10 J. Z. Hu, L. Q. Yang, M. W. Shin. Mechanism and thermal effect of delamination in light-emitting diode packages[J]. *Microelectron. J.*, 2007, **38**(2): 157~163
- 11 S. C. Yang, P. Lin, C. P. Wang *et al.*. Failure and degradation mechanisms of high-power white light emitting diodes[J]. *Microelectron. Reliab.*, 2010, **50**(7): 959~964
- 12 Wu Haibin, He Sumei, Wang Changling. Experimental research on the mechanism of causing fast luminous attenuation of white lamp-LED[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1363~1367
吴海彬,何素梅,王昌铃. 导致单管型白光发光二极管快速光衰的实验研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1363~1367
- 13 Liu Xijuan, Wen Yan, Zhu Shaolong. The definition of mean lifetime and text methods of white light emitting diode[J]. *Lamps and Lighting*, 2001, (4): 16~22
刘熙娟,温岩,朱绍龙. 白光 LED 的使用寿命的定义和测试方法[J]. *光源与照明*, 2001, (4): 16~22
- 14 X. A. Cao, P. M. Sandvik, S. F. LeBoeuf *et al.*. Defect generation in InGaN GaN light-emitting diodes under forward and reverse electrical stresses[J]. *Microelectronics Reliability*, 2003, **43**(12): 1987~1991
- 15 S. D. Lester, F. A. Ponce, M. G. Craford *et al.*. High dislocation densities in high efficiency GaN-based light-emitting diodes[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **66**(10): 1249~1251
- 16 D. S. Li, H. Chen, H. B. Yu *et al.*. Dependence of leakage current on dislocations in GaN-based light-emitting diodes[J]. *J. Appl. Phys.*, 2004, **96**(2): 1111~1114
- 17 P. N. Grillo, M. R. Krames, H. Zhao *et al.*. Sixty thousand hour light output reliability of AlGaInP light emitting diodes[J]. *IEEE Trans. Device Mater. Reliab.*, 2006, **6**(4): 565~569
- 18 Gao Guangbo, Li Xuexin. Reliability Physics of Semiconductor Device[M]. Beijing: Science Press, 1987. 458~465
高光渤,李学信. 半导体器件可靠性物理[M]. 北京: 科学出版社, 1987. 458~465