

doi:10.3788/gzxb20144308.0823003

静电对 GaN 基高压 LED 特性的影响

韩禹, 郭伟玲, 樊星, 俞鑫, 白俊雪

(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 基绿光高压 LED 分别施加 -500 、 $-1\ 000$ 、 $-2\ 000$ 、 $-3\ 000$ 、 $-4\ 000$ 、 $-5\ 000$ 和 $-6\ 000$ V 的反向人体模式静电打击, 每次静电打击后, 测量样品的 I - V 特性曲线及光通量等参量, 研究静电打击对 GaN 基高压 LED 器件性能的影响. 结果表明: 当样品经过 -500 、 $-1\ 000$ 、 $-2\ 000$ 、 $-3\ 000$ 和 $-4\ 000$ V 的静电打击后, 由于 LED 器件内部产生了缺陷, 发生了软击穿并且反向漏电流明显增加, 但光通量的变化不明显; 当经过 $-5\ 000$ V 和 $-6\ 000$ V 的静电打击后, 由于发生了热模式击穿, 温度迅速升高, 在结区形成熔融通道, 使 LED 的光通量明显减小, 甚至衰减到未打击时的一半; 在经受 $-6\ 000$ V 的静电打击后, 正向电压的减小和反向漏电流的增加更加明显, 漏电现象更加明显, 严重影响了器件的性能, 最终使 LED 样品失效.

关键词: GaN; 高压 LED; 静电放电; 失效机理; 光电特性

中图分类号: 文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)08-0823003-6

Effects of Electrostatic-Discharge on GaN-Based High Voltage Light-Emitting Diode

HAN Yu, GUO Wei-ling, FAN Xing, YU Xin, BAI Jun-xue

(Key Laboratory of Opto-electronics Technology, Ministry of Education,

Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: GaN-based high-voltage green light-emitting diodes were biased by negative Human-Body-Mode electrostatic discharge (ESD) with -500 , $-1\ 000$, $-2\ 000$, $-3\ 000$, $-4\ 000$, $-5\ 000$ and $-6\ 000$ V. The I - V characteristic and luminous flux under different electrostatic shock voltages were comparative analyzed after each shock. The results show that the LED has a soft breakdown which accompanied with apparent increased reverse leakage current and unapparent luminous flux change, which due to the generation of defect after ESD stressing at -500 , $-1\ 000$, $-2\ 000$, $-3\ 000$ and $-4\ 000$ V; When the device was biased to $-5\ 000$ V and $-6\ 000$ V, a sharp decrease of luminous flux appears, even decay to 50% of light output than before stressing. And forward voltage and reverse leakage current show a large degree of decrease and increase respectively after ESD shock of -6000 V, which is due to the thermal model breakdown at this moment. The thermal model breakdown make temperature rise rapidly and form a melting channel, which disabled the LED eventually.

Key words: GaN; High-voltage LED; Electrostatic discharge; Degradation mechanism; Optical and electrical characteristics

OCIS Codes: 230.0250; 230.3670; 350.1820; 160.4760

基金项目: 国家科技支撑计划 (No. 2011BAE01B14) 和国家自然科学基金 (No. 61107026) 资助

第一作者: 韩禹 (1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为半导体光电子器件. Email: hanyutianjin@emails.bjut.edu.cn

导师 (通讯作者): 郭伟玲 (1966-), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为半导体光电子器件. Email: guoweiling@bjut.edu.cn

收稿日期: 2013-12-03; 录用日期: 2013-03-06

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

发光二极管 (Light Emitting Diode, LED) 是一种新型固体光源, 它利用固体半导体芯片作为发光材料, 具有低能耗、长寿命、体积小、平面化、重量轻、方向性好、响应速度快、耐震、亮度高、无辐射、无污染和耐各种恶劣条件等优点, 被誉为继白炽灯、荧光灯、高压气体放电灯之后的第四代照明光源, 因此受到极大关注, 广泛应用于室内照明、交通指挥、汽车照明、景观照明、大屏幕显示和电子通信等领域, 将取代传统照明成为人类照明的主要方式^[1-3]. 高压 LED 实现了芯片级集成, 是由数颗小晶粒在芯片上串联在一起组成的. 在制造过程中, 采用半导体工艺制造电极将同一衬底上制造出的多颗相互隔离的小功率 LED 串联, 构成高电压 LED 芯片, 具有高的发光效率和整体光提取效率; 降低了驱动器的成本和空间, 提高了驱动器效率; 减小了散热, 提高了节能率; 增加了 LED 灯具的可靠性等优点^[4-5]. 以 GaN 材料为代表的宽带隙半导体由于禁带宽度大、高电子漂移饱和速度、导热性能好和化学稳定性等优点, 适合制作蓝光和绿光器件而逐渐成为研究的主流, GaN 基 LED 也将成为半导体照明的核心器件^[6].

LED 在实际应用中会有各种外界环境因素的影响, 其性能往往不能达到预期的效果, 其中静电就是影响因素之一. 目前, 大多数 GaN 基高压 LED 是在蓝宝石衬底上生长的, 晶格失配较大, 有很高的位错密度, 在器件的生产、制造、封装、运输、使用和测试等过程中非常容易受生产设备、材料和操作者带来的静电的影响^[7]. LED 器件在受到静电打击后会在器件内部产生缺陷, 从而出现软击穿现象和明显的漏电现象, 而当器件受到较大的电压静电打击后, 会发生热模式击穿, 温度迅速升高, 进而形成熔融通道, 并且此时的漏电现象更加明显, 器件的性能受到严重破坏. 目前对影响 LED 可靠性的报道^[8-9]主要集中在量子阱中载流子衰退机制、缺陷的影响、欧姆接触的演变及封装材料的退化等方面, 而对静电对 LED 影响的分析和研究的很少.

本文通过对 GaN 基绿光高压 LED 施加静电打击, 研究了静电打击前后 LED 的电学和光学参量的变化, 并分析了静电打击对 LED 性能的影响, 给出了相应物理解释.

1 实验

实验所用 LED 样品为自制的 12 V GaN 基绿光高压 LED, 样品由四颗小功率 LED 在芯片级串联组成, 每个晶粒的尺寸为 $250\ \mu\text{m} \times 250\ \mu\text{m}$. 采用的高压 LED 样品通过金属有机化学气相沉积法 (Metal Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD) 在蓝宝石衬底上

生长而成, 样品结构包括 GaN 缓冲层、n 型 Si 掺杂的 GaN 层、n 电极、n 型 AlGaIn 限制层、InGaIn/GaN 多量子阱 (Multiple Quantum Well, MQW) 有源区、p 型 AlGaIn 限制层、p 型 Mg 掺杂的 GaN 层、欧姆接触层和 p 电极. 高压 LED 芯片制备过程为: 先对清洗完的 LED 外延片刻蚀 n-GaN 台阶, 其刻蚀深度为 $1.1\ \mu\text{m}$, 再用感应耦合等离子刻蚀法 (Inductively Coupled Plasma, ICP) 刻蚀深隔离槽将晶粒隔开, 沟槽的深度不同的外延片结构而定, 刻蚀深沟槽的刻蚀深度为 $4\ \mu\text{m}$, 沟槽不能太宽以免减小发光面积. 在开出沟槽以后, 为了敷设连接各个 LED 的导线, 需要对器件侧壁进行绝缘层淀积, 采用 SiO_2 做为绝缘层材料, 通过等离子体增强化学气相沉积法 (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD) 进行淀积, 厚度为 $300\ \text{nm}$, 淀积 SiO_2 绝缘层不仅可以防止短路, 而且可以起到填充沟槽的作用. 接着用电子束蒸发的方法淀积生长 $220\ \text{nm}$ 的 ITO 薄膜作为电流扩展层, 电流扩展层不仅可以减小电流拥挤效应还可以将电极注入的电流分散到未被电极遮挡的地方, 从而提高 LED 器件的外量子效率. 最后按照连接要求淀积相应的电极, n 型欧姆接触电极采用 Ti/Al/Ti/Au 结构, p 型欧姆接触电极用 Ni/Au 透明电极, 导线电极采用直接爬过沟槽的方法制造, 从而把它们串联在一起. 图 1 为 GaN 基绿光高压 LED 的结构示意图和点亮后器件的发光情况.

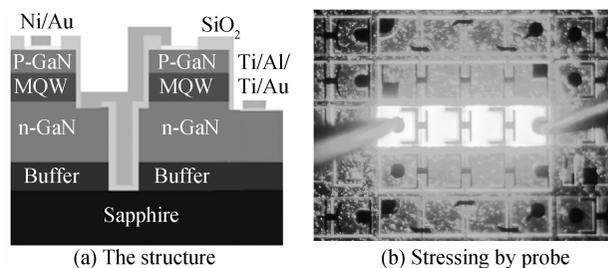


图 1 GaN 基绿光高压 LED
Fig. 1 GaN-based high-voltage green LED

静电放电 (Electrostatic Discharge, ESD) 常用的放电模型有人体静电放电模型 (Human Body Model, HBM) 和机器静电放电模型 (Machine Model, MM), 其中 HBM 是模拟人体产生的静电, 是日常生活中最常见的静电源, 在器件制造和使用过程中, 由人体静电造成器件损伤失效的比例较大. 在无静电防护情况下, 人体的简单活动就可能产生很高的静电电位. 静电打击实验是对 GaN 基绿光高压 LED 样品采用人体模式的静电打击, 研究普通人体模型放电情况下静电对 LED 特性的影响. 反向静电打击电压分别为 -500 、 $-1\ 000$ 、 $-2\ 000$ 、 $-3\ 000$ 、 $-4\ 000$ 、 $-5\ 000$ 和 $-6\ 000\ \text{V}$, 每个样品打击 3 次, 每次打击间隔 $2\ \text{s}$, 所用设备为美国的 Model 910 Electrostatic Discharge Simulator. 每次静电

打击后对 LED 样品进行电学和光学参量测试,主要包括测量样品的正向和反向 $I-V$ 特性曲线,比较受到不同的反向电压静电打击后 $I-V$ 特性曲线的变化;测量样品的光通量等参量,分析它们随反向静电打击电压的变化趋势.测试设备分别为 Keithley 仪器公司的 4200 Semiconductor Characterization System 和杭州远方的 PMS-50 紫外-可见-近红外光谱分析系统.每次测量 LED 光学参量均在正常工作电流 20 mA 下进行.

2 结果与讨论

2.1 电学性能测试与分析

LED 是半导体二极管的一种,半导体二极管的 $I-V$ 特性曲线是表征其性能优劣的重要特征之一.半导体二极管具有单向导电性,其理想的 $I-V$ 特性曲线是在正向偏压下,正向偏压达到开启电压后,正向电流随正向偏压的增加呈指数关系迅速增大;在反向偏压下,半导体二极管不发光,但有反向电流,这个反向电流非常小.当反向偏压增大到某个数值时,反向电流突然开始迅速增大,发生反向击穿^[10].实验中所用的 LED 在静电打击之前的 $I-V$ 特性曲线近似于理想半导体二极管的 $I-V$ 特性曲线.

图 2 是 GaN 基绿光高压 LED 样品每次经静电打击后测得的正向和反向 $I-V$ 特性曲线,由图 2 可知,当

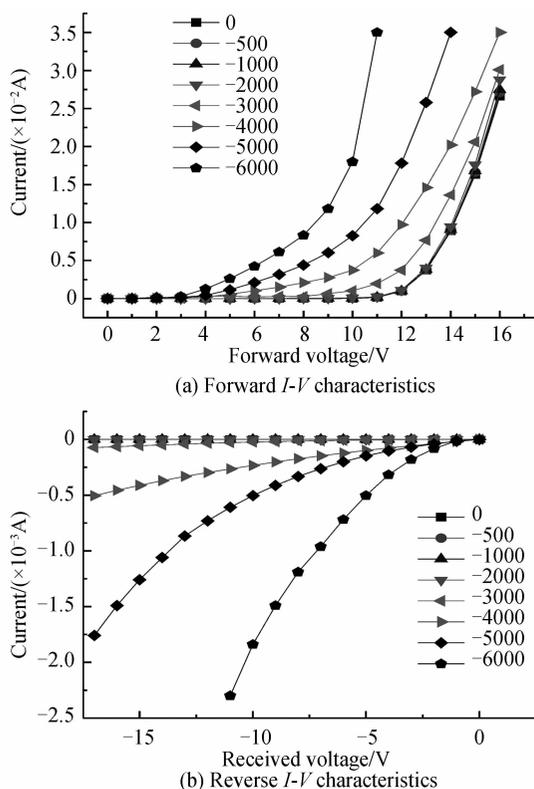


图 2 经不同的反向电压静电打击后测得的正向和反向 $I-V$ 特性曲线

Fig. 2 Forward and reverse $I-V$ characteristics of the LED after different reverse voltage shock

经过比较小的反向电压静电打击后,正反向 $I-V$ 特性曲线随反向静电打击电压的变化都不是很明显,正向电压 V_F 和反向漏电流 I_R 几乎没有变化.随着反向静电打击电压的增加, $I-V$ 特性曲线的变化越来越明显,在正向条件下,电流随外加电压的升高明显增大,并且正向电压 V_F 的下降趋势越来越明显,在反向条件下,反向漏电流 I_R 开始明显增加,LED 的漏电现象越来越明显.由图 2(a) 可以看到,对样品施加 -500 、 -1000 和 -2000 V 的静电打击后, $I-V$ 特性曲线变化并不明显,正向电压 V_F 几乎没有变化.对样品施加 -3000 V 的静电打击后才有相对明显的变化,LED 样品发生了软击穿;由图 2(b) 可以看到,经过 -3000 V 的静电打击后,反向漏电流 I_R 几乎没有什么变化,而经过 -4000 V 的静电打击后,反向漏电流明显增加,LED 开始有明显的漏电现象.因此被较小反向静电电压打击的样品 PN 结特性并未遭到本质性的破坏,基本保持了 PN 结的特性.

样品经过 -500 、 -1000 、 -2000 、 -3000 和 -4000 V 的静电打击后,虽然发生了软击穿且反向漏电流有了明显增加,但是 LED 光通量的变化不是很明显,如图 3 所示,说明样品并没有发生热模式击穿,而是在器件内部产生了缺陷.在高电场下,有源层中的载流子可以获得足够高的能量发生碰撞电离并被加速,高速载流子与晶格碰撞,在限制层中产生深能级态,空间电荷区产生点缺陷(空位和间隙)^[11],同时高能量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^[12],静电打击后缺陷被进一步扩大.

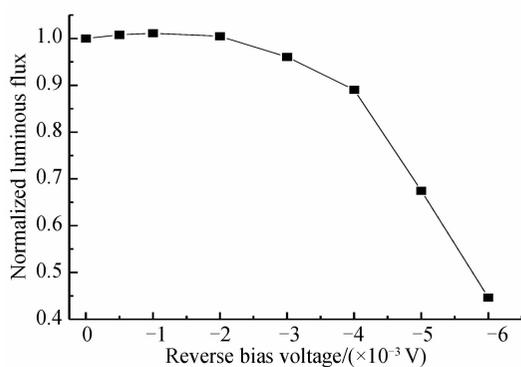


图 3 高压 LED 光通量随反向静电打击电压的变化
Fig. 3 Luminous flux of HV LED after different reverse ESD voltage shock

在正向偏压下,载流子的复合有两种方式,其中一部分电子直接被限制层中的深能级俘获,发生直接复合,剩余的电子在正向电场作用下进入有源区,被有源区中的缺陷俘获,发生非辐射复合,所以在较小的偏置电压下,会出现软击穿现象.在反向偏压下,势垒高度增加,量子阱中的电子在反向电压的作用下不必越过

能量很大的势垒,而是直接隧穿到限制层中和深能级复合,所以在反向偏压下可以看到有明显的漏电现象.文献[13]指出,GaN基高压LED多数是在蓝宝石衬底上生长的,缺陷密度很高,但在有源层中存在一些螺旋位错(Threading Dislocation,TD).当LED受到较小的反向电压静电打击后,会导致LED局部被击穿,在位错的附近沿有源层向限制层方向产生点缺陷.点缺陷的引入会在有源层的量子阱能带结构引入深能级,深能级的复合作用比较强,是有效的复合中心,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,产生非辐射复合.点缺陷引入的深能级,宏观上相当于产生了额外的电流通路,增大了反向漏电流.

对样品施加 $-5\ 000\ \text{V}$ 和 $-6\ 000\ \text{V}$ 的静电打击后,LED光通量有了明显减小,甚至衰减到未打击时的一半,如图3.由图2可以看出,在受到 $-6\ 000\ \text{V}$ 的静电打击后,正向电压 V_F 和反向漏电流 I_R 出现较大程度的减小和增加,说明此时发生了热模式击穿,这也是LED衰减的主要原因.高光渤等指出^[14],静电打击会引起PN结局部反向击穿,强电流不再均匀流过结区而是集中于击穿点,这个击穿点是个小区域,形成了细丝电流,通过击穿点的细丝电流,使结区局部加热升温产生热斑,温度的升高导致本征载流子浓度增加,从而使结温进一步升高.当击穿点的温度达到本征温度时,流过击穿点的细丝电流密度急剧增加,局部温度也随之迅速上升,热导率急剧下降,热斑扩散温度上升更快,形成巨大或者中等的微等离子体,核心温度可以达到 $1\ 000\ \text{C}\sim 1\ 400\ \text{C}$,在结区形成熔融通道.从图2(a)可以发现,样品受 $-6\ 000\ \text{V}$ 静电打击后,正向 $I-V$ 特性曲线在电压比较低的范围内呈线性变化,表明此时电流全部流过熔融通道.测试发现只有当电流很大时,LED才会发出微弱的光;反向 $I-V$ 特性曲线也呈类似线性变化,反向电流比较大,此时LED表现出类似于电阻的特性,等同于一个电阻.在这种情况下,由于PN结部分被破坏,载流子浓度的空间分布发生改变,PN结能带两端倾斜减缓,内建电场减小,导通不需要开启电压,几乎失去了PN结的特性,这时LED样品已经失效.

2.2 光学性能测试与分析

通过对GaN基绿光高压LED样品在不同反向静电打击电压下光学参量的测量,得出LED样品在 20mA 工作电流条件下的光通量随反向静电打击电压的变化曲线,如图3.从图中可以看出,样品经 -500 、 $-1\ 000$ 、 $-2\ 000$ 、 $-3\ 000$ 和 $-4\ 000\ \text{V}$ 反向静电打击后,光通量变化不明显,说明没有发生热模式击穿,而是在器件内部产生了缺陷.对样品施加 $-5\ 000\ \text{V}$ 和 $-6\ 000\ \text{V}$ 反向静电打击后,LED光通量明显减小,甚

至衰减到未打击时的一半,说明此时发生了热模式击穿,这是LED光通量衰减的主要原因.当LED样品受到较小的反向电压静电打击后,在器件内部产生缺陷及深能级,随着反向静电打击电压的增加,缺陷数量增加,载流子被LED中的杂质和缺陷所俘获,发生非辐射复合,导致光输出减少.当载流子数量足够多,注入载流子填充了所有缺陷,使缺陷饱和时,剩下的载流子部分发生辐射复合并且伴随着光输出,因此LED样品的光通量并没有发生显著变化^[15].在LED样品受到较大的反向电压静电打击后,在结区形成熔融通道,只有当通过熔融通道的电流饱和时,才会发生辐射复合.并且通过击穿点的细丝电流,使结区局部加热升温产生热斑,温度的升高导致本征载流子浓度增加,使结温进一步升高^[14],并加速了整个器件的退化,使LED样品的光通量明显减小,经 $-6\ 000\ \text{V}$ 的静电打击后,光通量衰减到未打击时的一半以下.

2.3 静电打击前后高压LED芯片的表面形貌

图4是实验所用的GaN基绿光高压LED芯片受到 $-6\ 000\ \text{V}$ 静电打击前后的显微镜照片.从图4(b)可以看出,静电打击引起PN结局部击穿,随着温度的升高,在结区形成熔融通道.

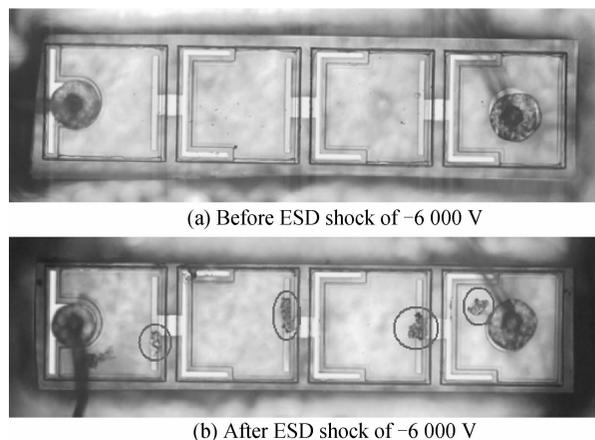


图4 GaN基绿光高压LED芯片显微镜照片

Fig. 4 The microphotographs of GaN-based high-voltage green LED chip

经静电打击后,用扫描电子显微镜(Scanning Electronic Microscope,SEM)得到失效的LED样品中熔融通道照片,见图5.从图中可以看到,LED样品表面有较大的熔融区域,严重影响了器件的性能,使LED样品完全失效.

2.4 高压LED静电保护方法

静电打击对GaN基高压LED器件性能影响很大,容易造成器件失效,是影响其可靠性的主要因素.因此对器件采取有效的静电保护措施,提高GaN基高压LED的抗静电能力尤为重要.目前LED静电保护方法有:1)为LED芯片并联一个电路,如二极管等,作为静电保护电路起到泄流限压的作用.正装结构中,在

GaN 基 LED 芯片中集成 GaN 肖特基二极管;倒装结构中,在硅 sub-mount 上集成背靠背的两个齐纳二极管.通过这两种并联二极管作为静电保护电路的方式,为 LED 提供电流旁路,将静电大部分甚至全部从旁路释放.2)改进 LED 芯片设计,通过优化材料结构、改善版图及改进工艺设计,使器件结构更完整,得到良好的电流横向扩展特性,使电流扩展及 p-n 结结温更均匀,从而提高器件的抗静电能力.考虑到成本、体积和工艺等因素,本文采用第二种方法,来提高高压 LED 器件的抗静电能力.在高压 LED 中加入钝化层以提升器件的可靠性,减小器件的漏电流;对晶粒尺寸进行优化,减小电流拥挤效应,优化电流扩展;改变 n 型 GaN 层厚度或 p 电极金属厚度,使电流通路上的阻值发生变化,使电流密度大的地方因为阻值变化而降低.

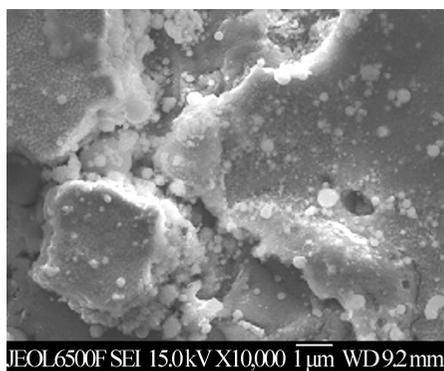


图 5 LED 样品受到静电打击后形成熔融通道的 SEM 照片
Fig. 5 The SEM image of LED with molten channel after ESD shock

3 结论

对 GaN 基绿光高压 LED 施加 -500 、 $-1\ 000$ 、 $-2\ 000$ 、 $-3\ 000$ 、 $-4\ 000$ 、 $-5\ 000$ 和 $-6\ 000$ V 的反向人体模式静电打击,每次静电打击后,测量样品的电学参量和光学参量,主要包括样品的正向和反向 $I-V$ 特性,比较受到不同的反向电压静电打击后 $I-V$ 特性的变化;测量样品的光通量等参量,分析它们随反向静电打击电压的变化趋势.分析表明:当样品经 -500 、 $-1\ 000$ 、 $-2\ 000$ 、 $-3\ 000$ 和 $-4\ 000$ V 的静电打击后,发生了软击穿并且反向漏电流有了明显增加,但是 LED 光通量的变化不明显,说明没有发生热模式击穿,而是在器件内部产生了缺陷,载流子被 LED 中的杂质和缺陷俘获,发生非辐射复合;当样品经 $-5\ 000$ V 和 $-6\ 000$ V 的静电打击后,LED 光通量明显减小,甚至衰减到未打击时的一半;在受到 $-6\ 000$ V 的静电打击后,正向电压 V_F 和反向漏电流 I_R 分别表现出较大程度的减小和增加,这是因为此时发生了热模式击穿,也是 LED 光通量衰减的主要原因.通过击穿点的细丝电流,使温度迅速升高,最终在结区形成熔融通道,此时的漏电现象更加明显,严重影

响了器件的性能,使 LED 样品失效.因此,受到较小的反向电压静电打击后,样品 PN 结特性并未遭到本质性的破坏;LED 样品受到较大的反向电压静电打击后,PN 结部分被破坏,载流子浓度的空间分布发生改变,PN 结能带两端倾斜减缓,内建电场减小,导通不需要开启电压,几乎失去了 PN 结的特性,这时 LED 样品失效.静电打击对 GaN 基高压 LED 器件性能的影响很大,为了保证 LED 具有良好的可靠性,提高 LED 性能,提出了为 LED 芯片并联一个电路以及改进 LED 芯片设计等几种有效的静电保护方法.

参考文献

- [1] JUNTUNEN E, SITOMANIEMI A, TAPANINEN O, *et al.* Thermal performance comparison of thick-film insulated aluminum substrates with metal core PCBs for high-power LED modules[J]. *IEEE*, 2012, **2**(12): 1957-1964.
- [2] LUO Xiao-xia, LIU Hua, LU Zhen-wu, *et al.* Automated optimization of free-form surface lens for LED collimation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(9): 1351-1355.
罗晓霞,刘华,卢振武,等.实现 LED 准直照明的优化设计[J]. *光子学报*, 2011, **40**(9): 1351-1355.
- [3] LI Wei, YUE Qing-yang, KONG Fan-min, *et al.* Influence of surface ZnO nano-structures on the light emitting efficiency of GaN-based LED[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(4): 409-416.
李伟,岳庆扬,孔繁敏,等.顶端 ZnO 纳米结构对 GaN 基 LED 光提取效率的影响[J]. *光子学报*, 2013, **42**(4): 409-416.
- [4] CHEN K J, Kuo H T, Chiang Y C, *et al.* Efficiency and droop improvement in hybrid warm white LEDs using InGaN and AlGaInP high-voltage LEDs[J]. *IEEE*, 2013, **9**(4): 280-284.
- [5] CAO Dong-xing, GUO Zhi-you, LIANG Fu-bo, *et al.* The fabrication and performance analysis of GaN-based HV LED [J]. *Chinese Journal of Physics*, 2012, **61**(13): 511-517.
曹东兴,郭志友,梁伏波,等. GaN 基高压直流发光二极管制备及其性能分析[J]. *物理学报*, 2012, **61**(13): 511-517.
- [6] LI Jian-hua, CUI Yuan-shun, CHEN Gui-bin. Structural phase transition, electronic structures and optical properties of GaN [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(2): 161-166.
李建华,崔元顺,陈贵宾. GaN 结构相变、电子结构和光学性质 [J]. *光子学报*, 2013, **42**(2): 161-166.
- [7] JEON S K, LEE J G, PARK E H, *et al.* The effect of the internal capacitance of InGaN-light emitting diode on the electrostatic discharge properties[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, **94**(13): 131106.
- [8] MENEGHINI M, VACCARI S, TRIVELLIN N, *et al.* Analysis of defect-related localized emission processes in InGaN/GaN-based LEDs[J]. *IEEE*, 2012, **59**(5): 1416-1422.
- [9] ZHANG J H, WU B Q, SHIH T M, *et al.* Thermal analyses of alternating current light-emitting diodes[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, **103**: 153505.
- [10] 刘恩科,朱秉升,罗晋生. *半导体物理学*[M]. 北京:电子工业出版社, 2003: 54.
- [11] CAO X A, SANDVIK P M, LEBOEUF S F, *et al.* Defect generation in InGaN/GaN light-emitting diodes under forward and reverse electrical stresses [J]. *Microelectronics Reliability*, 2003, **43**(12): 1987-1991.
- [12] WU Guo-qing, GUO Wei-ling, ZHU Yan-xu, *et al.* Effects of human body mode electrostatic on carrier movement and the reliability of GaN-based blue light-emitting diode[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2012, **33**(10): 1132-1137.

- 吴国庆,郭伟玲,朱彦旭等.人体模式静电对 GaN 基蓝光 LED 载流子运动及其可靠性的影响[J].发光学报,2012,**33**(10):1132-1137.
- [13] MENEGHINI M,TAZZOLI A,RANZATO E,*et al.* A study of the failure of GaN-based LEDs submitted to reverse-bias stress and ESD events [C]. Reliability Physics Symposium (IRPS),2010 IEEE International. IEEE,2010:522-527.
- [14] 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.
- [15] ARMSTRONG A,HENRY T A,KOLESKE D D,*et al.* Dependence of radiative efficiency and deep level defect incorporation on threading dislocation density for InGaN/GaN light emitting diodes [J]. *Applied Physics Letters*,2012,**101**(16):162102-162102-4.