

文章编号: 1000-7032(2024)09-1539-08

GaN基 Micro-LED 反向漏电流失效机理分析

王 伟^{1*}, 张腾飞², 王绶珩¹

(1. 无锡学院 江苏省集成电路可靠性技术及检测系统工程研究中心, 江苏 无锡 214105;

2. 南京信息工程大学 电子与信息工程学院, 江苏 南京 210044)

摘要: 针对 GaN 基蓝光 Micro-LED 芯片, 采用温度应力和电压应力的实验方法研究了其反向漏电流失效机理。结果表明, 在温度应力下, Micro-LED 芯片退化前的反向漏电流主要由多步热辅助隧穿电流构成, 且受 Poole-Frenkel (PF) 隧穿机制影响; 电压应力 (-85 V) 退化后, 反向漏电流会随着应力时间的延长而增大, 此时由多步热辅助隧穿电流转换为空间电荷限制电流机制 (SCLC)。通过分析退化前后的能带图得知, 长时间的电压应力会发生击穿现象, 导致 Micro-LED 芯片内部电场剧烈变化, 电子能够以高能量碰撞到晶格原子, 产生大量的载流子, 从而增加了非辐射复合率, 使得反向漏电流由原来的 1.9766×10^{-7} A 增大到 1.5834×10^{-4} A。

关键词: Micro-LED; 失效机制; 非辐射复合; 隧穿通道; 反向漏电流

中图分类号: TN312⁺.8

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20240164

Analysis of Failure Mechanism of Reverse Leakage Current in
GaN-based Micro-LEDsWANG Wei^{1*}, ZHANG Tengfei², WANG Shouyu¹

(1. Jiangsu Province Integrated Circuit Reliability Technology and Testing System Engineering Research Center,

Wuxi University, Wuxi 214105, China;

2. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

* Corresponding Author, E-mail: 860009@cwuxu.edu.cn

Abstract: For GaN-based blue Micro-LED chips, experimental methods involving temperature and voltage were used to investigate the reverse leakage current failure mechanism in this paper. The results demonstrate that, under temperature stress, the reverse leakage current of Micro-LED chips, prior to degradation, is primarily composed of multi-step thermal-assisted tunneling current, which is significantly influenced by the Poole-Frenkel (PF) tunneling mechanism. After degradation under voltage stress (-85 V), the reverse leakage current increases with the extension of stress time, transitioning from a multi-step thermal-assisted tunneling current to a space-charge-limited current (SCLC). Through analyzing the band diagrams before and after degradation, it was determined that prolonged voltage stress leads to breakdown phenomenon, resulting a drastic change in the internal electric field of the Micro-LED chip. Electrons are then able to collide with lattice atoms with high energy, generating numerous carriers. Consequently, this increase the rate of non-radiative recombination, causing the reverse leakage current to increase from an original value of 1.9766×10^{-7} A to 1.5834×10^{-4} A.

Key words: Micro-LED; failure mechanism; non-radiative recombination; trap-assisted tunneling; reverse leakage current

收稿日期: 2024-07-02; 修订日期: 2024-07-17

基金项目: 南京信息工程大学滨江学院人才启动科研项目(2019 r005, 550219005); 企业横向(2021320205000041, 2023320205000242, 2023320205000242, 560124081)

Supported by Talent Initiation Research Project at Nanjing University of Information Science & Technology, Binjiang College (2019 r005, 550219005); Horizontal Integration(2021320205000041, 2023320205000242, 2023320205000242, 560124081)

1 引 言

微型发光二极管(Micro-LED)是一种新型的显示器件。特别是具有高亮度、高对比度、低功耗等优点的氮化镓(GaN)基 Micro-LED,有望作为新一代高效光源应用于光通信、固态照明、显示技术等领域,尤其在近眼显示和大尺寸高清显示领域崭露头角,极具市场潜力^[1-5]。Micro-LED 芯片质量不仅影响 Micro-LED 显示屏画质,而且是整机成本控制并实现产业化的关键。因此,加强对 Micro-LED 准确性的探讨有着重大价值。

目前,国内外研究者们已普遍使用电流或温度为应力对 LED 开展了加速寿命试验^[6]。2017年,Zhao 等对 GaN 基蓝光 LED 在不同温度下进行应力试验,研究表明,价带的电子首先是隧穿到准费米能级附近没有被占据的局域态上,然后沿着准费米能级附近几个 kT 范围内的局域态进行连续跳跃,最终跳跃至导带,使得反向电流逐渐增大^[7]。2019年,庄琼云等通过对 GaN 基绿光 LED 芯片进行加速电流应力条件下的老化试验发现,随着老化时间的延长,在反向偏压时,缺陷能级具有漏电通道的作用,使得反向电流增大^[8]。2023年,曾友华等在温度 85 °C 和湿度 85% 条件下开展了 GaN 基白光 LED 的老化试验,结果表明,LED 正向电流急剧增加是因为 P 电极 Al、Cr 和 Au 等金属出现了电流迁移,使得 P 电极与 LED 芯片外延层之间的电压通路的电流增大,表现出 LED 正向电流增大的现象^[9]。2024年,Wang 等对 Micro-LED 芯片在温度为 85 °C 和湿度为 85% 的高温高湿环境下,进行了老化试验 336 h,研究表明,芯片在长时间的老化过程中,材料发生了退化,接触电阻增加,导致 Micro-LED 芯片的平均亮度显著下降^[10]。

但是,大多数的研究都集中于传统 LED 失效机理分析,对 Micro-LED 器件的失效研究集中于巨量转移、全彩化实现以及发光效率的研究,对 Micro-LED 反向漏电的失效机理分析较少。由于 Micro-LED 芯片表面的金属化线条极细,通常在 1 ~ 100 μm ^[11],其所承受的电流密度会急剧增加,对其可靠性造成影响,容易导致 Micro-LED 失效。在高电场下,LED 还会发生很大的电气故障,表现出的基本现象就是当反向电压高于某个临界值时,GaN 基 LED 的漏电流显著增加,从而导致器件稳定性下降,甚至出现无法修复的击穿行为^[12-13]。

研究发现,即使使用反向电压小于临界值,器件依然可能会发生退化,退化程度会随着时间的长短而不同。

基于国内外研究现状,可以发现目前 Micro-LED 器件在反向漏电失效机理方面的研究比较少。因此,本文从微观层面分析 GaN 基 Micro-LED 芯片漏电流失效机制,并结合温度应力和电压应力的实验方法,对 GaN 基 Micro-LED 的反向漏电流失效机理进行了研究,阐明了其内在的物理机制,对于推进 GaN 基 Micro-LED 的广泛应用具有一定的科学意义与价值。

2 实 验

实验样品采用 GaN 基蓝光 Micro-LED 芯片,发光波长为 450 nm,外延片采用金属有机化学气相沉积(MOCVD)技术在蓝宝石衬底(Sapphire)上异质外延生长,结构示意图如图 1 所示。其中外延片为多层结构,从上至下依次为 P-GaN、MQW、N-GaN、U-GaN(缓冲层)和蓝宝石衬底,使用了传统的 GaN 基 Micro-LED 芯片工艺技术,把外延片制作成 25 μm × 25 μm 的 Micro-LED 芯片,将其安装在导线结构中用金线焊接。

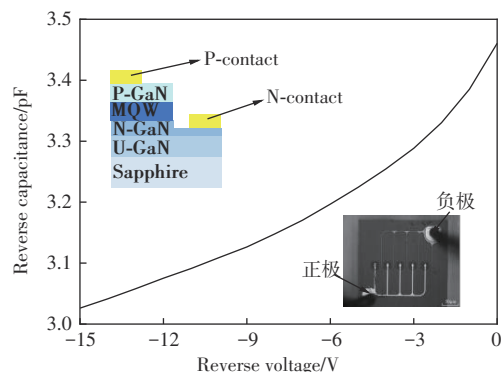


图1 蓝光 Micro-LED 芯片室温下的 C - V 曲线,插图为器件结构示意图和尺寸特征图

Fig.1 The C - V curve of the blue Micro-LED chip at room temperature, with the inset showing the schematic diagram of the device structure and dimensional characteristics

蓝光 Micro-LED 芯片的电流-电压(I - V)和电容-电压(C - V)曲线测试采用的设备为 Keithley 4200 A-SCS 参数分析仪,其中 I - V 曲线测试范围是 0 ~ -100 V; C - V 曲线测试范围是 0 ~ -15 V。变温的 I - V 数据采用带有加热圆盘的探针台,利用探针进行样品的正负极接触,然后利用 Keithley 4200 A-SCS 参数分析仪进行变温的 I - V 测试,其中测试

温度范围为 300 ~ 500 K。退化前与退化后的电参数使用 Keithley 2657 电源表进行测量。失效点表征采用无锡芯鉴半导体技术科技有限公司的 HOTMOS-2000 微光显微镜系统进行失效定位。

3 结果与讨论

图 1 给出室温下 Micro-LED 芯片的 C - V 特性曲线,选用直流扫描电压档位,测试范围为 -15 ~ 0 V,交流低信号频率为 1 MHz,限制幅值为 30 mV。

由于 Keithley 4200 A-SCS 参数分析仪的最大电容限制,只能测到反向电压 -30 V 的 C - V 数据。为了突破该限制,本文结合 C - V 曲线数据并使用电容公式进行拟合,可得到更高反向电压的电容以开展分析,其中电容公式和耗尽层宽度公式如公式(1)、(2)所示:

$$C = A \sqrt{\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r q}{2(V_D - V)}} \cdot \frac{N_A N_D}{N_A + N_D}, \quad (1)$$

$$W_d = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{C}, \quad (2)$$

其中, $\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-14}$ F/cm 为真空介电常数, $\varepsilon_r \approx 9$ 为 GaN 材料的相对介电常数, q 为带电电荷, N_A 为带正掺杂浓度, N_D 为带负掺杂浓度, V_D 为内电势, C 为电容值, A 为 Micro-LED 芯片的面积, W_d 是耗尽层宽度。这里可将公式(1)中常数统一设为常数 K_0 ,如公式(3)所示:

$$K_0 = \sqrt{\varepsilon_0 \varepsilon_r q \frac{N_A N_D}{N_A + N_D}} A^2, \quad (3)$$

$$C = \sqrt{\frac{K_0}{2(V_D - V)}}, \quad (4)$$

通过 C - V 数据拟合得到 K_0 为 6.225×10^{-12} F²·V,再将其反向高电压带入公式(4),即可得到不同反向高电压下的电容值、电场强度以及耗尽层宽度 W_d 的数值。

图 2 是根据 C - V 曲线得到的 $1/C^2$ - V 曲线,其近似线性。当 $1/C^2=0$ 时,拟合直线与横坐标的截距即为内电场电势 $\varphi_b \approx 3.4$ V,上述的 C - V 曲线分析可为后续 Micro-LED 芯片反向漏电机理分析提供重要的实验数据。

图 3 展示了 Micro-LED 芯片在不同温度下的 I - V 半对数变化曲线。由图中可发现,在各种温度下的 I - V 曲线几乎处于平行状态,描述了电压与电流满足指数关系。根据先前的研究表明^[14-16],当温度应力大于 200 K 时,LED 芯片反向漏电主要是多步热辅助隧穿电流受 Poole-Frenkel 效应影

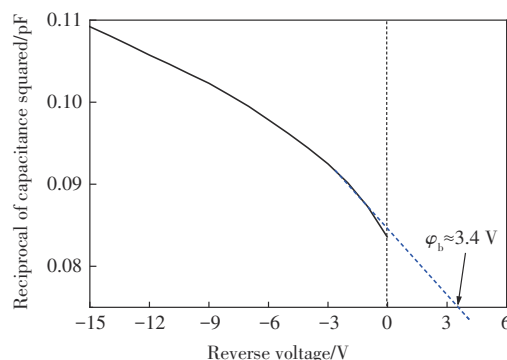


图2 蓝光 Micro-LED $1/C^2$ - V 曲线

Fig.2 The $1/C^2$ - V curve of blue light Micro-LED

响^[16-17]。因此假设 Micro-LED 芯片也符合 PF 机制的模型,如公式(5)~(7)所示:

$$I \propto \exp\left\{-\frac{E_a}{kT}\right\}, \quad (5)$$

$$E_a = \Phi_0 - \beta_{PF} F^{\frac{1}{2}}, \quad (6)$$

$$\beta_{PF} = \sqrt{\frac{e^3}{\pi \varepsilon_0 \varepsilon_r}}, \quad (7)$$

其中 E_a 为陷阱激活能,即降低电子从局域态跳出所要求的能量; k 是玻尔兹曼常数; Φ_0 是电场强度 F 为零时 PF 势垒的高度; β_{PF} 为 PF 的系数; F 是耗尽区上的外电场强度。电场强度可以通过芯片的 C - V 曲线数据获得,如公式(8)所示:

$$F = \frac{\varphi_b - V}{W_d}. \quad (8)$$

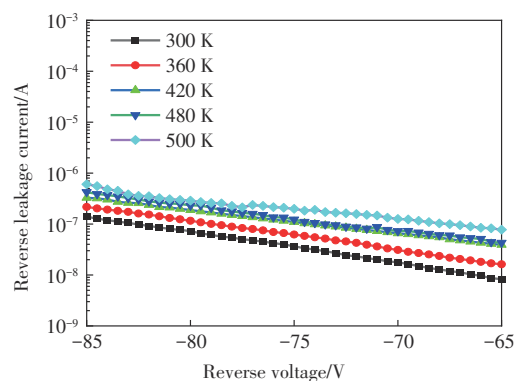


图3 蓝光 Micro-LED 芯片不同温度下的 I - V 曲线

Fig.3 The I - V curve of blue light Micro-LED chips at different temperatures

为探索 Micro-LED 芯片反向漏电的机理,通过 I - V 数据,取 -65 V 电压条件下,电流随温度倒数而改变的 Arrhenius 曲线,如图 4 所示。从图中可以发现,在高温下对应的漏电流与高温特性相关性十分明显,并且特征曲线与当前文献研究报

道的大致相同^[17-18]。因此,在高温下可假设 Micro-LED 芯片反向漏电本质是电场辅助多步热辅助隧穿电流。根据多步热辅助隧穿电流公式(5)进行拟合,从而得到电压-65 V 对应的热激活能为 134.9 meV。

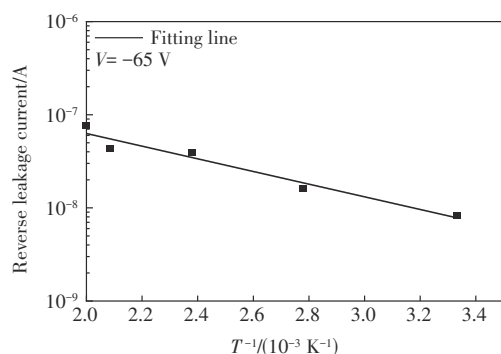


图 4 电压-65 V 下电流随温度倒数变化曲线

Fig.4 The curve of current versus the reciprocal of temperature at -65 V

多步热辅助隧穿势垒随电压的增大而逐渐减小,应满足 Pool-Frenkel 关系式。因此,分别取电压值为-65 V、-70 V、-75 V、-80 V 和-85 V 时不同温度下的电流值,拟合出相应电压下的电流随温度倒数变化的 Arrhenius 曲线,如图 5 所示。根据公式(5)进行拟合,得出 $V=-65, -70, -75, -80, -85$ V 时的热激活能 E_a 分别为 134.9, 117.6, 99.9, 86.1, 78.7 meV。可见,随着反向电压的增大, E_a 会逐渐减小。

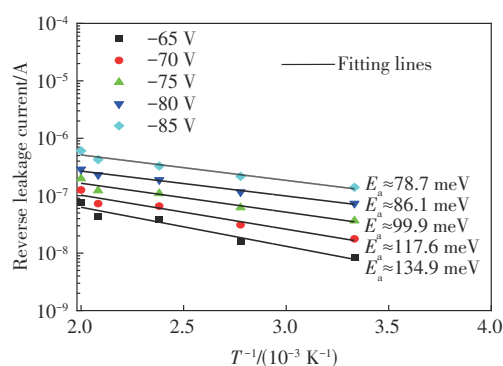


图 5 不同电压下电流随温度变化曲线

Fig.5 The curve of current versus the reciprocal of temperature at different voltages

根据公式(5)拟合得到的热激活能数据,图 6 给出了热激活能随电场强度而改变的曲线。在图中可以看出,激活能与电场强度的开方近似为一条直线,说明它们成反比关系,也证实了高温下反向漏电流是多步热辅助隧穿电流的假设。因此,根据

图中实验数据,利用公式(5)和(6)进行拟合,结果得出 $\Phi_0=921.51$ meV, $\beta_{PF}=3.23 \times 10^{-4}$ eV $\cdot$ V^{-1/2} $\cdot$ cm^{1/2}。其中 β_{PF} 的值还可以通过理论公式(7)计算得到,其为 $\beta_{PF}=3.28 \times 10^{-4}$ eV $\cdot$ V^{-1/2} $\cdot$ cm^{1/2}。可见实验拟合和理论计算的 β_{PF} 非常接近,进一步验证了 Micro-LED 芯片反向漏电流为多步热辅助隧穿电流。

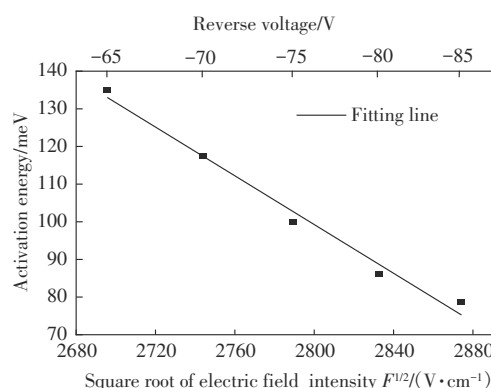


图 6 热激活能随电场强度 $F^{1/2}$ 变化曲线

Fig.6 The curve of activation energy versus the square root of electric field strength

根据以上分析,图 7 给出的是多步热辅助隧穿电流示意图。从图中可以看出,当温度高于 300 K 后,电子的热动能会随着温度升高而增加,从而缓解了相近局域态之间势垒差的影响,使得参与到跃迁活动的局域态迅速增长,也提高了电子移动的速度速率。但由于反向电压的增加,内部电场相应扩大,电子的热激活能也相应减少,此时具有低能量的电子也可以加入到跳跃活动中,提高了电子在局域态跳跃的速率,由此形成了电场增强的多步热辅助隧穿电流。

图 8 给出了蓝光 Micro-LED 芯片在不同偏置反向电压下的 I - T 电流监控图。从图中可以看出,给芯片施加的反向电压小于 30 V 时,虽然没有明

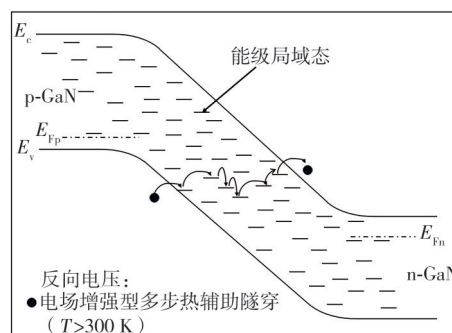


图 7 多步热辅助隧穿电流示意图

Fig.7 Schematic diagram of multi-step thermally assisted tunneling current

显的漏电流现象,但是电流抖动仍然明显,此时很有可能是早期缺陷所致。当施加的反向电压大于30 V直至击穿电压(-115 V)前,漏电流随退化时间增大并且电流出现上下波动。当施加的偏置电压达到-115 V时,维持16 s之后,漏电流突然下降到 $6.55\text{E}^{-9}\text{ A}$,芯片出现击穿现象,这是一种无法修复的击穿行为,表明芯片已经损坏。同时还能发现,施加的反向电压越是接近击穿电压,反向漏电流越大。

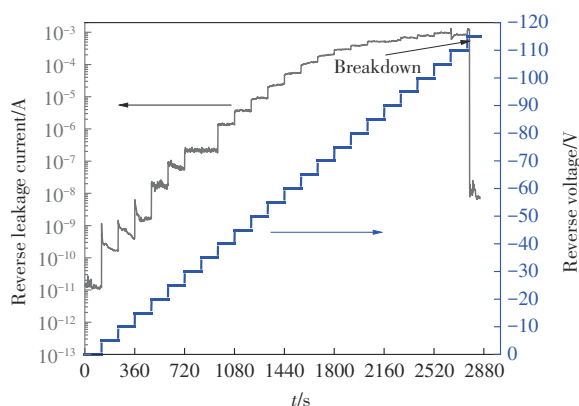


图8 GaN基 Micro-LED 芯片的步进应力试验结果

Fig.8 The results graph of step stress test for GaN-based Micro-LED chips

为了避免器件在退化过程中发生击穿现象,根据图8对 Micro-LED 芯片的 I - T 电流监控结果, Micro-LED 芯片在-85 V 条件下,芯片并未击穿损坏。因此,图9提供了蓝光 Micro-LED 芯片在室温-85 V 电压下随退化时间的 I - V 变换曲线。从图中可以看出,随着电压应力时间的增加,反向漏电流随之增加,特别是退化前20 min,反向漏电流的幅度变化最大。这是因为在高电场下,大量载流子随着外界电场由电极注入到半导体中,这些注入的载流子会不断地积累在半导体材料中,从而产生空间电荷^[19];又因为材料中缺陷态的存在^[20],大量的载流子会完全填充缺陷态,此时器件的电流处于无陷阱的空间电荷限制电流区,如公式(9)所示的 Mott-Gurney 公式^[21]:

$$j = \frac{9}{8} \varepsilon \varepsilon_0 \mu \frac{V^2}{L^3}, \quad (9)$$

其中 j 为空间限制电流, μ 为载流子迁移率, L 为器件材料的厚度, V 是施加的偏压。当退化到40 min 和 60 min 时,虽然反向漏电流也在增加,但是与退化前20 min 相比,漏电流增加的幅度明显变小,说明此时受到了缺陷态的影响,部分载流子

被缺陷态捕获之后不再参与传输,材料中的自由载流子的浓度有所降低,其处于欧姆区与无陷阱的空间电荷限制区之间,此时电流表现为陷阱填充的空间电荷限制电流,可用公式(10)描述^[22]:

$$j = \frac{9}{8} \varepsilon \varepsilon_0 \mu \theta \frac{V^2}{L^3}, \quad (10)$$

其中 θ 为自由载流子在总载流子中的占比。

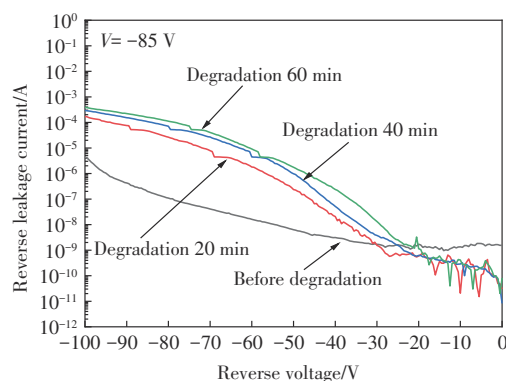


图9 GaN基 Micro-LED 芯片退化前后反向漏电流变化

Fig.9 Graph of reverse leakage current variation before and after degradation of GaN-based Micro-LED chips

根据当前的研究表明,LED 反向漏电流与偏压表现出良好的乘方关系,即 $I \propto V^x$ ^[23]。为了进一步研究反向漏电流的失效机理,本文采用双对数坐标的方式来描绘反向 I - V 曲线,如图10所示,反向漏电流与偏压的 x 次方显示出良好的线性关系,其中直线的斜率就是 V 的指数 x 。

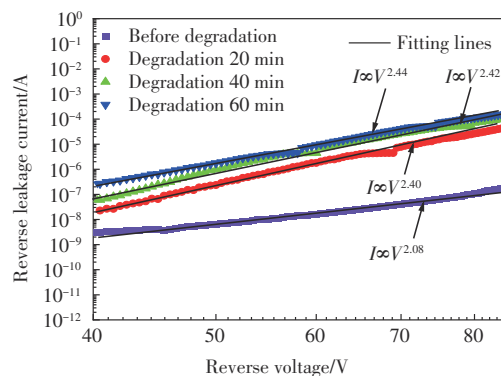


图10 GaN基 Micro-LED 芯片双对数坐标系下的电应力退化前、后反向 I - V 关系

Fig.10 Graph of reverse I - V relationship of GaN-based Micro-LED chips before and after electrical stress in a double logarithmic coordinate system

图10中显示的反向漏电流与偏压乘方的关系对应于空间电荷限制电流机制(SCLC)^[23]。对于 GaN 基 Micro-LED, 它的空间电荷可视为一种类

绝缘体,但是它的漏电流不会影响注入电流的因素,这两点都符合 SCLC 电流产生的条件。根据 Mott-Gurney 的理论研究表明^[24],当材料中不出现缺陷或者缺陷陷阱没有被激发时, $x=2$;当材料中存在缺陷或者缺陷陷阱被激发时,此时 $x>2$ 。除此之外, x 的值不仅与陷阱的状态相关,也和缺陷的数量有关^[25]。因此,本文利用最小二乘法对曲线进行拟合。可以看到,对于尚未开始退化的器件,指数 $x=2.08$;电压应力 20 min 后,指数 $x=2.40$;电压应力 40 min 后,指数 $x=2.42$;电压应力 60 min 后,指数 x 增加到了 2.44。可见电压应力随着退化时间延长会增加 Micro-LED 芯片的缺陷浓度。

图 11 展示了蓝光 Micro-LED 芯片在室温 -85 V 电压下随退化时间的 C - V 变换曲线。从图中可以看出,随着电压应力时间的增加,反向电容随之减小,特别是退化前 20 min,反向电容的减小幅度变化最大。当退化到 40 min 和 60 min 时,反向电容虽然在减小,但是与退化前 20 min 相比,减小幅度明显降低。由公式(2)可知,在 -85 V 下的耗尽层宽度会随着退化时间的增加而增大,直至达到极限状态。该结果为后续的能带图分析提供了重要的实验数据。

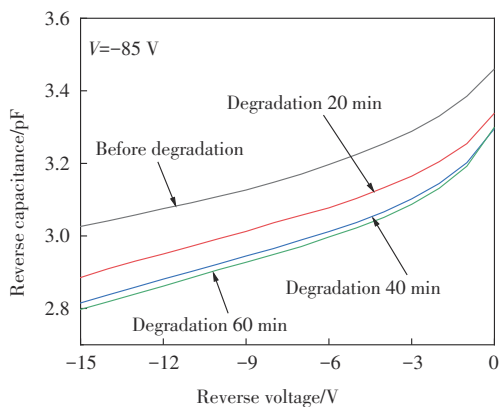


图 11 GaN 基 Micro-LED 芯片退化前后反向电容变化
Fig.11 Capacitance changes in GaN-based Micro-LED chips before and after degradation

图 12 给出的是 Micro-LED 芯片在 -85 V 电压应力随时间变化的 EMMI (微光显微镜) 热点失效的定位图。从图中可以发现,热点大多分布在 Micro-LED 芯片外延层上,而且每个热点分布是不均匀的。从理论上讲,每一个失效热点都对应着 Micro-LED 芯片的一个导电通道,并且本次样品采用的是水平结构的 Micro-LED 芯片,

电流密度拥挤。这就更能说明, Micro-LED 的漏电流在空间分布上是极其不平衡的,所以这些导电通道很有可能就是导致 Micro-LED 芯片失效的根源。并且在相同阈值的调节下,随着退化时间的不断延长,失效的热点区域在不断地变大。这就意味着, Micro-LED 芯片在退化的过程中,随着退化的时间越长,失效区域面积明显增大,漏电严重区域的热点远远高于漏电较小区域的热点,这种失效点数量与电流之间表现出来的关系与在 GaN 基 HEMT 退化过程中的现象类似^[26]。

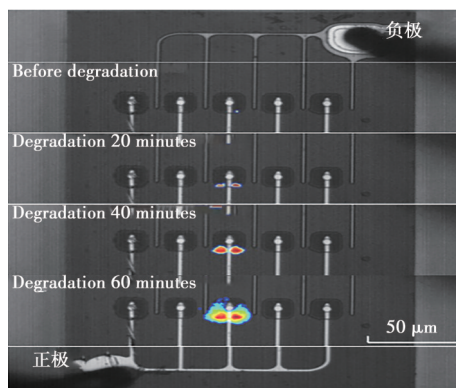


图 12 Micro-LED 器件退化过程中的热点区域图
Fig.12 Map of hotspot regions during the degradation process of Micro-LED chips

图 13 为对 Micro-LED 芯片在 -85 V 电压下退化前后进行的能带分析,禁带宽度 E_g 不随退化时间变化。其中图 13(a)给出的是 Micro-LED 退化前的能带图,由图 10 对 I - V 曲线分析可得,退化前,耗尽区不存在缺陷或者缺陷未被激活。因此,从图 13(a)可知,当施加 -85 V 时, Micro-LED 内部电场增大,势垒高度增加,导带底部低于价带顶部,此时有少量电子从价带隧穿到导带,一定程度上增加了非辐射复合的概率,故退化前如图 12 所示,失效热点面积较小。图 13(b)给出了 Micro-LED 退化后的能带图,根据前文器件退化后的分析, Micro-LED 退化后,耗尽区出现了缺陷或者缺陷被激活,故增加了电子从价带隧穿到导带的几率。由图 11 可知,退化后电容减小,耗尽层宽度变大,与退化前相比, Micro-LED 内部电场增大更明显,势垒高度更大,导带底部与价带顶部之间的距离更大,大量的电子更加轻易地从价带隧穿到导带,从而极大地增加了非辐射复合的概率。故退化后如图 12 所示,失效热点面积逐渐变大,使得反向漏电流随之增加。

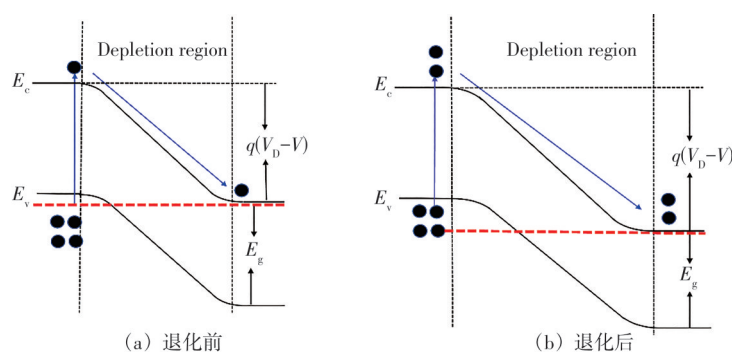


图13 GaN基 Micro-LED 芯片能带图。(a)退化前;(b)退化后(黑点表示电子)

Fig.13 Band diagram of GaN-based Micro-LED chips. (a)Before degradation. (b)After degradation(Black dots indicate electrons)

4 结 论

本文基于实验测试对高温下的 Micro-LED 芯片的反向漏电流进行分析,实验结果表明,温度应力下,退化前的反向漏电流主要由多步热辅助隧穿电流占主导,受 PF 效应影响。随着电压应力加速退化后,蓝光 Micro-LED 芯片内部的缺陷经过退化出现了增殖,缺陷所在层出现了缺陷能级,此时反向漏电流主要表现为空间电荷机制。综上所述

述, Micro-LED 芯片反向漏电流失效机理主要由多步热辅助隧穿电流转换为空间电荷限制电流机制,二者均表现为反向漏电流增大。因此,在 Micro-LED 芯片生产过程中,减少 Micro-LED 芯片耗尽层中的缺陷密度是非常有必要的。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjil.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20240164>.

参 考 文 献:

- [1] FRANDOLI G, D'ACUNZO M, HADA D, *et al.* Advanced screen printing: application on microLED tiled display [J]. *J. Soc. Inf. Disp.*, 2022, 30(4): 263-270.
- [2] WU M C, CHUNG M C, WU C Y. 3 200 ppi matrix-addressable blue MicroLED display [J]. *Micromachines*, 2022, 13(8): 1350.
- [3] LI S B, SONG B F, PETERSON T, *et al.* MicroLED chromatic confocal microscope [J]. *Opt. Lett.*, 2021, 46(11): 2722-2725.
- [4] CHEN Z, YAN S K, DANESH C. MicroLED technologies and applications: characteristics, fabrication, progress, and challenges [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2021, 54(12): 123001.
- [5] HUANG Y G, HSIANG E L, DENG M Y, *et al.* Mini-LED, Micro-LED and OLED displays: present status and future perspectives [J]. *Light: Sci. Appl.*, 2020, 9: 105.
- [6] HUANG J L, GOLUBOVIĆ D S, KOH S, *et al.* Degradation mechanisms of mid-power white-light LEDs [M]. VAN DRIEEL W K, FAN X J, ZHANG G Q. *Solid State Lighting Reliability Part 2: Components to Systems*. Cham: Springer, 2018: 381-432.
- [7] ZHAO L, CHEN L, YU G, *et al.* Tunneling-hop** transport model for reverse leakage current in InGaN/GaN blue light-emitting diodes [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2017, 29(17): 1447-1450.
- [8] 庄琼云, 潘书万, 陈松岩, 等. GaN基绿光 LED 芯片电流加速失效机理研究 [J]. *光电子·激光*, 2019, 30(6): 588-592.
 ZHUANG Q Y, PAN S W, CHEN S Y, *et al.* Degradation mechanisms of GaN-based green LED after accelerated DC current aging [J]. *J. Optoelectron. · Laser*, 2019, 30(6): 588-592. (in Chinese)
- [9] 曾友华. GaN基白光 LED 正向电压增大失效机理分析 [J]. *电子产品可靠性与环境试验*, 2023, 41(5): 65-70.
 ZENG Y H. Failure mechanism analysis of GaN-based white LED forward voltage increase [J]. *Electron. Prod. Reliab. Environ. Test.*, 2023, 41(5): 65-70. (in Chinese)
- [10] WANG K F, CHEN Z H, ZHOU H J, *et al.* Optical, electrical, and mechanical reliability of 1 700 PPI Micro-LED

- device [J]. *Microelectron. Reliab.*, 2024, 158: 115431.
- [11] 郭春辉, 孙雪娇, 郭凯, 等. 紫外光通信用日盲型LED研究进展 [J]. *发光学报*, 2023, 44(10): 1849-1861.
GUO C H, SUN X J, GUO K, *et al.* Recent progress of solar blind light emitting diodes for ultraviolet optical wireless communication use [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(10): 1849-1861. (in Chinese)
- [12] MENEHINI M, ZEHNDER U, HAHN B, *et al.* Degradation of high-brightness green LEDs submitted to reverse electrical stress [J]. *IEEE Electron Device Lett.*, 2009, 30(10): 1051-1053.
- [13] NARENDRAN N, GU Y, FREYSSINIER J P, *et al.* Solid-state lighting: failure analysis of white LEDs [J]. *J. Cryst. Growth*, 2004, 268(3-4): 449-456.
- [14] 赵琳娜. 氮化镓基发光二极管电流输运和可靠性研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2018.
ZHAO L N. *Research on Current Transport and GaN Based Light Emitting Diodes* [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2018. (in Chinese)
- [15] 王颖哲. 电场、热场及辐射场作用下氮化物紫外LED退化机制研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
WANG Y Z. *Degradation Mechanisms of the Nitride-based Ultraviolet LEDs Under Electrical, Thermal and Radiation Fields* [D]. Xi'an: Xidian University, 2020. (in Chinese)
- [16] 吕家将. 高光效大功率蓝光InGaN/GaN LED芯片制造及其漏电机理研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2018.
LV J J. *Study on Manufacturing Technology and Leakage Current Mechanisms for High Efficiency and High Power InGaN/GaN Light-emitting Diodes* [D]. Wuhan: Wuhan University, 2018. (in Chinese)
- [17] KIM J, KIM J, TAK Y, *et al.* Effect of V-shaped pit size on the reverse leakage current of InGaN/GaN light-emitting diodes [J]. *IEEE Electron Device Lett.*, 2013, 34(11): 1409-1411.
- [18] SHAN Q F, MEYAARD D S, DAI Q, *et al.* Transport-mechanism analysis of the reverse leakage current in GaInN light-emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, 99(25): 253506.
- [19] 朱小祥. 有机材料中长寿命缺陷态表征及其对量子点发光二极管影响的研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2023.
ZHU X X. *Analysis of Long-lived Traps in Organic Materials and Their Effects On quantum-dot Light-emitting Diodes* [D]. Changchun: Jilin University, 2023. (in Chinese)
- [20] JIANG H, HU W P. The emergence of organic single-crystal electronics [J]. *Angew. Chem., Int. Ed.*, 2020, 59(4): 1408-1428.
- [21] LAMPERT M A, SCHILLING R B. *Current Injection in Solids: the Regional Approximation Method* [M]. Amsterdam: Elsevier, 1970, 6: 1-96.
- [22] ROSE A. Space-charge-limited currents in solids [J]. *Phys. Rev.*, 1955, 97(6): 1538-1544.
- [23] NANA R, GNANACHCHELVI P, AWAAH M A, *et al.* Effect of deep-level states on current-voltage characteristics and electroluminescence of blue and UV light-emitting diodes [J]. *Phys. Status Solidi*, 2010, 207(6): 1489-1496.
- [24] LEIGHTON P A. Electronic processes in ionic crystals (Mott, N. F.; Gurney, R. W.) [J]. *J. Chem. Educ.*, 1941, 18(5): 249.
- [25] PARK J H, KIM J K, CHO J. Observation of space-charge-limited current in AlGaIn/GaN ultraviolet light-emitting diodes [J]. *Mater. Lett.*, 2018, 214: 217-219.
- [26] 张璐, 宁静, 王东, 等. AlGaIn/GaN HEMT的恒压电应力退化研究 [J]. *微电子学*, 2020, 50(2): 276-280.
ZHANG L, NING J, WANG D, *et al.* Study on electric stress degradation of AlGaIn/GaN HEMT under constant voltage [J]. *Microelectronics*, 2020, 50(2): 276-280. (in Chinese)



王伟(1984-),男,江苏泰兴人,博士,副教授,高级工程师,硕士生导师,2012年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事半导体光电子及其可靠性方面的研究。
E-mail: 860009@cwuxu.edu.cn