

GaN 基白光发光二极管失效机理分析*

薛正群¹⁾ 黄生荣²⁾ 张保平¹⁾³⁾ 陈 朝^{1)3)†}

1) (厦门大学物理系, 厦门 361005)

2) (厦门三安电子有限公司, 厦门 361005)

3) (福建省半导体照明中心, 厦门 361005)

(2009 年 10 月 13 日收到; 2009 年 11 月 25 日收到修改稿)

对小功率白光 GaN 基发光二极管(LED)在室温、40 °C 和 70 °C 下进行温度加速老化寿命实验,通过对老化前后不同时间段器件的电学、光学和热学特性进行测量来分析器件的失效机理,着重分析器件的芯片和荧光粉的失效机理. 器件老化前后的 I - V 特性表明:老化过程中,器件的串联电阻和低正向偏压下的隧道电流增大,这是由于器件工作时其芯片的欧姆接触退化和半导体材料的缺陷密度升高而引起的. 器件的热特性表明:高温应力下器件的热阻迅速变大,封装材料迅速退化,这是器件退化的主要原因;光谱曲线表明温度加速了器件的光功率衰减,并使荧光粉的转换效率迅速降低. 最后使用阿伦尼斯方程对室温下器件的预测寿命进行了计算,并分析了 GaN 基白光 LED 的失效机理.

关键词: 加速老化, 失效机理, GaN, 白光 LED

PACC: 7280E, 8170C

1. 引 言

GaN 基发光二极管(LED)由于其高效、节能、环保等方面的优点,已经广泛应用于图像显示、信号指示和照明领域^[1],成为了当今半导体技术发展的热点. 白光 LED 照明被公认为新一代的半导体照明光源^[2],具有巨大的经济效益和应用前景. 然而要实现半导体照明急需解决的一个重要问题就是提高 LED 的寿命与可靠性,如果不能实现高可靠性和长寿命的 LED 光源,即使发光效率再好,昂贵的维护成本也必然会限制其在各个领域的应用. 根据美国照明研究中心(LRC)的 Narendran 等^[3]对白光 LED 进行的寿命实验,小功率封装的白光 LED 寿命只有几千个小时,大功率 LED 比小功率 LED 的可靠性提高很多,可以达到有几万小时的寿命. 不过白光和蓝光 LED 从商业化到现在才经历了十几年,技术仍在不断完善之中;而且不同产家 LED 的芯片和封装也有差别,同一产家的不同批次 LED 质量也不一样;所以 LED 的寿命并不像很多产家所乐观估计的那样可以达到 10 万小时. 如何提高 LED 的可

靠性成为了 LED 研究的重点,而对 LED 可靠性的研究成为了提高其可靠性的前提和基础.

通常对 GaN 基 LED 可靠性的研究采用温度、电流加速寿命实验^[4-7]. 我们实验组将温度加速和电流加速同时运用于 LED 进行老化实验,对器件进行老化分析^[8]. 还采用激光诱导掺杂的方法来提高 LED 外延片 p-GaN 层的空穴浓度^[9-12],由此降低了常规 GaN 基 LED 器件的串联电阻;与未经激光掺杂的 LED 相比,通过加速老化实验显示激光诱导掺杂的 LED 性能明显改善,表明老化过程器件的欧姆接触退化是其衰退的重要因素. Osinski 等^[13]分析了老化过程 p 型电极金属会沿着材料的螺旋位错到达 pn 结区形成欧姆通路,并造成结区特性退化. Yang 等^[14]说明了高温下半导体的材料缺陷密度迅速增大,并导致 LED 器件的漏电流增加. 此外,高温下环氧树脂热退化^[15,16]、荧光粉转化效率降低^[17]等也是 LED 器件失效的原因.

本文对 InGaN/GaN 多量子阱小功率白光 LED 进行温度加速老化实验,通过对器件老化前后的 I - V 特性、光通量、热阻、光谱等参数的测量,并分析了小功率 GaN 基白光 LED 的失效机理.

* 国家自然科学基金(批准号:60476022)和国家高技术研究发展计划(批准号:2004AA311020)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: cchen@xmu.edu.cn

2. 实 验

实验样品为 InGaN/GaN 多量子阱发蓝光 ($\lambda = 456 \text{ nm}$) 的芯片上涂 YAG: Ce³⁺ 黄光荧光粉, 封装成的 TO-5 型小功率白光 LED.

实验前, 在室温下点亮 LED 100 h, 测量其光电参数, 剔除光通量变化较大、突然失效的样品, 从而保证了实验样品一致性. 在正向电流 $I_f = 20 \text{ mA}$ 下点亮 LED, 器件分别在室温和两个加速老化温度 40 °C 及 70 °C 下工作, 每个温度下 LED 各 10 只.

实验过程中使用 Ocean Optics 光谱仪测量器件的输出光功率; 用 YOKOGAWA GS610 型信号源测量其 I - V 特性; 用瞬态热阻测试仪 (T3Ster, MicRed, Ltd) 对其热阻进行分析.

3. 结果与讨论

3.1. I - V 特性曲线和漏电流分析

图 1(a) 所示的是室温下器件在老化前后的正向 I - V 特性变化曲线. 图中 I - V 曲线有三个特征区域^[18]: 在正向电压 $V < 2 \text{ V}$ 的低电压区域, 器件的电流主要是和材料位错有关的隧道电流; 在正向偏压在 2—3 V 区域, 器件的电流主要是以扩散电流为主; 正向偏压 $V > 3 \text{ V}$ 时, I - V 特性曲线大致呈线性, 器件的电流主要受到器件串联电阻的影响.

图 1(c) 所示的是 LED 器件外延片结构图, 在 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 上生长 n-GaN 衬底, 生长 InGaN/GaN 多量子阱作为发光层, 再生长 p-AlGaIn 覆盖层, 最后再生长 p-GaN 作为 p 型电极层, 整个结构可近似地看作为 np 异质结. 对于异质 np 结, 在加正向偏压时 np 结中 n 区的电子将有两种途径进入 p 区^[19]: 一种是通过热电子发射越过势垒进入 p 区; 另一种是间接隧道过程, 电子穿透势垒经过界面能级进入 p 区. 经过 pn 结的总电流是这两种电流的叠加. 对于异质结二极管, 在小电压下越过势垒的热电子数目很少, 热电子发射电流很小, 总电流由隧道电流决定. 器件的隧道电流有关系式^[19]

$$I = BN_i \exp\left[\frac{-4(2m^*)^{\frac{1}{2}}E_b^{\frac{2}{3}}}{3q\hbar F_0}\right] \times \exp\left[\frac{2(2m^*)^{\frac{1}{2}}E_b^{\frac{1}{3}}}{\hbar F_0}qV\right], \quad (1)$$

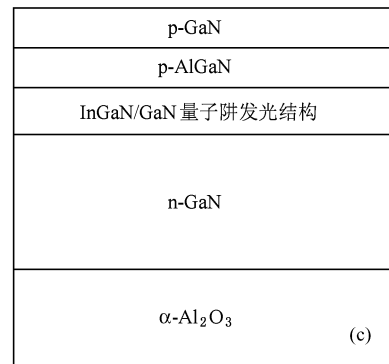
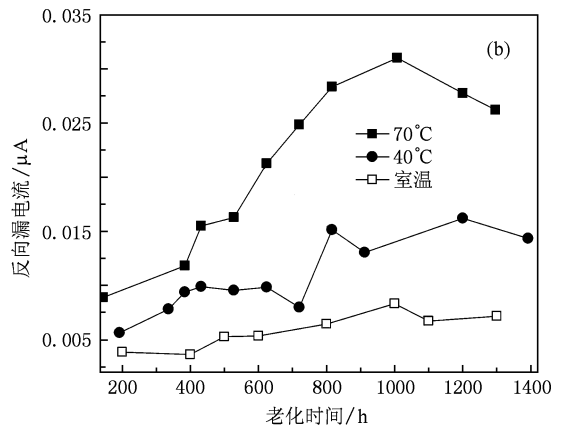
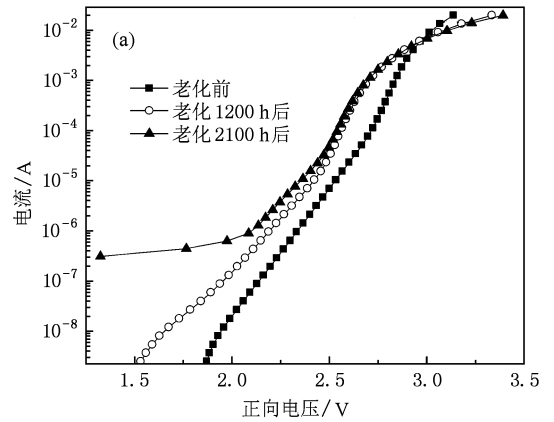


图 1 I - V 特性曲线和漏电流分析图 (a) 室温下的 I - V 特性变化曲线, (b) 不同环境温度下器件在 -5 V 下的反向漏电流随老化时间的关系, (c) LED 外延片结构图

其中 B 是常数, N_i 是禁带中的缺陷中心密度, E_b 是电子 (或空穴) 隧穿的势垒高度, \hbar 为约化普朗克常数, m^* 为载流子的有效质量, q 为电子电量, F_0 为耗尽层中的电场, V 为外加电压.

从图 1(a) 中可以看出, 老化过程中器件低电压 ($V < 2 \text{ V}$) 下的电流随着老化而变大. 主要是由于一方面老化过程中材料的缺陷密度变大, 进而导致 N_i 变大; 另一方面温度加速老化相当于一个退火过

程^[20],这个过程能激活器件中材料受主杂质(如 p-GaN 层中的 Mg)从而提高了材料的掺杂浓度 N .

对(1)式取对数,并简化为

$$\ln I = \ln BN_i + x + yV, \quad (2)$$

其中系数

$$x = \exp\left[\frac{-4(2m^*)^{\frac{1}{2}}E_b^{\frac{2}{3}}}{3q\hbar F_0}\right],$$

$$y = \exp\left[\frac{2(2m^*)^{\frac{1}{2}}E_b^{\frac{1}{3}}}{\hbar F_0}q\right].$$

设正向电压为 V_1 ($V_1 < 2$ V) 时,器件在老化前、老化 1200 h 和老化 2100 h 后的电流分别为 I_1, I_2 和 I_3 , 缺陷中心密度分别为 N_{i1}, N_{i2} 和 N_{i3} . 依据图 1(a) 可知 $I_1 < I_2 < I_3$, 则由(2)式可得到 $BN_{i1} < BN_{i2} < BN_{i3}$; 由于 B 是常数, 所以可知 N_{i1}, N_{i2} 和 N_{i3} 随着老化过程依次变大.

对于半导体 pn 结, 其耗尽区中的电场 F_0 满足关系^[21]

$$F_0 \propto \frac{V_{bi}}{W},$$

其中 V_{bi} 为耗尽区的内建电势, W 为耗尽区宽度, 耗尽区宽度 W 与 \sqrt{N} (N 为材料的杂质浓度) 成反比. 对于温度加速老化引起的杂质浓度 N 增大, 可引起

(1) 式中的 $\exp\left[\frac{-4(2m^*)^{\frac{1}{2}}E_b^{\frac{2}{3}}}{3q\hbar F_0}\right]$ 项变大; 而在低偏

压 V 下, (1) 式中的 $\exp\left[\frac{2(2m^*)^{\frac{1}{2}}E_b^{\frac{1}{3}}}{\hbar F_0}qV\right]$ 项可以考

虑不变. 因此老化过程引起材料掺杂浓度 N 的提高也是器件在低偏压下电流变大的一个原因.

从图 1(a) 中可以看出, 老化过程中器件低电压 ($V < 2$ V) 下的电流随着老化而变大. 主要是由于老化过程中材料的缺陷密度变大, 进而导致 N_i 变大. 依据(1)式可知老化过程中器件低电压段下的电流变大.

LED 在正向电流 $I_F = 20$ mA 下的工作电压称为其正向工作电压 V_F , V_F 有关系式

$$V_F = V_j + I_F \cdot R_s, \quad (3)$$

其中 V_j 为 LED 结区的电压降, R_s 为器件的串联电阻包含电极接触电阻和体电阻.

在正向偏压 $V > 3$ V 时, 此时 I - V 曲线大致呈线性, 如图 1(a) 所示. 从图中可以看出在相同的偏压下 LED 的正向电流随老化时间而降低, 主要是由于温度加速老化过程引起器件欧姆接触的退化以及半导体材料的缺陷密度增大而导致器件的串联电

阻 R_s 变大. 结合图 1(a) 并考虑(3)式, 可知在相同的正向偏压下, 器件的正向电流会随着老化的过程而增大.

图 1(b) 所示的是三个环境温度下 LED 器件在 -5 V 偏压下的反向漏电流随老化时间的关系曲线. 在 70 °C 的加速老化温度下, 器件的反向漏电流随老化时间迅速增大, 在老化 1000 h 后超过 0.03 μ A; 在 40 °C 环境温度下, 器件的反向漏电流也变化较大, 老化 1400 h 后也达到了将近 0.015 μ A. 相比之下, 室温下器件的漏电流变化较小, 老化前小于 0.005 μ A, 老化 1300 h 后也不超过 0.01 μ A. Hsu 等^[22] 对 InGaN/GaN 蓝光 LED 芯片在 300 — 900 °C 温度范围内退火, 通过扫描电镜(TEM)和 X 射线能量分散计数分析技术(EDS)方法观测发现退火导致芯片 p 型电极(Ni/Au)金属杂质沿着 p-GaN 表面的螺旋位错扩散形成短路, 致使芯片的漏电流增大, 温度越大漏电流增加越明显; 在 300 °C 和 400 °C 下退火 10 min, 芯片在 -5 V 下的漏电流分别为 0.04 μ A 和约 0.4 μ A. 实验中的 LED 芯片采用 Ni/Au 合金(在 550 °C 的 N_2 气氛中退火 2 min)作为 p 型电极, LED 器件在 70 °C 环境温度下老化 1000 h 后漏电流只达到 0.03 μ A 量级, 可能是由于 p 型电极金属沿着 p-GaN 表面的螺旋位错扩散形成短路相对不明显, 但仍是器件高温下形成漏电流的重要因素. 综合上面的分析可知高温下器件的半导体材料缺陷密度增大以及 p 电极金属沿着材料的螺旋位错扩散而形成短路, 是 LED 在高的环境温度下漏电流迅速变大的主要原因.

3.2. 热阻分析

图 2 是采用瞬态热阻测试仪 (T3Ster, MicRed, Ltd) 测量出来的 LED 器件微分结构函数图. 横坐标为器件的热阻 R_{th} , 纵坐标为其微分结构函数 K .

热阻为导热介质两端的温度差与通过其热流功率的比值, LED 的热阻定义为

$$R_{th, J-X} = \frac{T_J - T_X}{P_{th}}, \quad (4)$$

其中 $R_{th, J-X}$ 为 LED 的 pn 结区 J 点到指定参考点 X 之间的热阻, T_J 为测试条件稳定时 LED 的结温, T_X 为指定参考点的温度, P_{th} 为 LED 的热耗散功率.

根据半导体器件的热传输 Cauer 网络模型^[23], 考虑到 LED 内部不同材料的热阻和热容不同, LED 器件的微分结构函数表示为^[24]

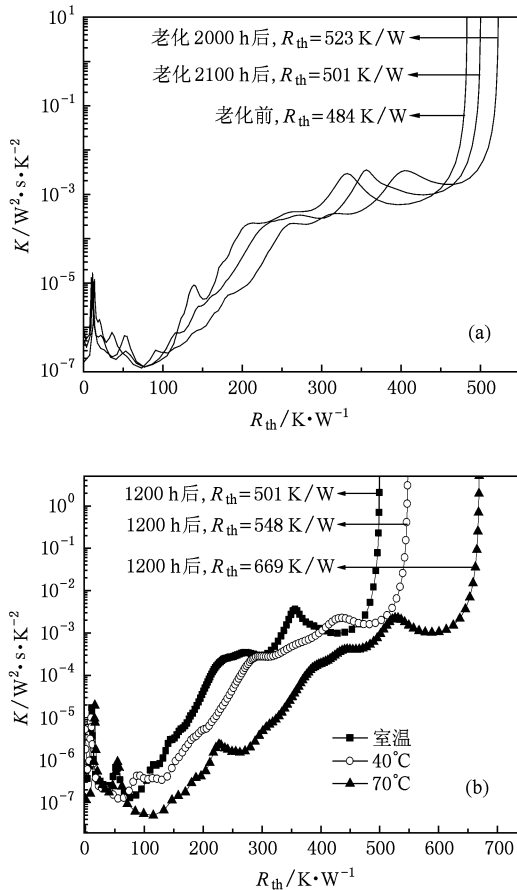


图2 LED的微分结构函数变化图 (a)室温下,(b)不同环境温度下

$$K = c\lambda A^2, \quad (5)$$

其中 c 为比热容(单位: $\text{W} \cdot \text{s} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$), λ 为热导率(单位: $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), A 为热传导路径上的横截面积(单位: m^2).

如图2所示,图中曲线变化的位置(如拐点)表示热流经过两种不同材料的界面时由于两种材料的横截面尺寸、热容和热导率不同而产生的变化,因此利用拐点位置判断出不同材料的位置. 根据LED器件热传输路径不难判断图2(a)中左下角的第一个峰位为LED芯片的热阻. 图2(a)是器件室温下老化前后的微分结构函数图,从图中可以看出老化1200 h后器件的热阻增加17 K/W,2000 h后器件的热阻增加39 K/W. 图2(b)所示的是器件在室温和两个加速温度下的微分结构函数图,可以看出高温下器件的热阻迅速增大,40 °C下老化1200 h后的热阻增加64 K/W,而70 °C下老化1200 h后器件的热阻增加了185 K/W. 对于GaN基LED器件来说,其芯片、黏结层、反光碗支架和封装材料的热膨

胀系数是不同的;由此可知高温下器件的导热性能降低,热阻变大,器件迅速衰退;主要的原因可能是由于高温导致的芯片、黏结层、反光碗支架和封装材料之间由于不同原子的热膨胀系数不同而导致不同的材料在界面处出现局部断层^[4]以及环氧树脂高温下的黄化^[25]等引起的.

3.3. 光谱分析

对于LED器件其输出光功率 F 为^[26]

$$F = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} f(\lambda) d\lambda, \quad (6)$$

其中 $f(\lambda)$ 为光谱功率分布函数, $\lambda_1 - \lambda_2$ 为器件的发光波长范围.

图3所示的是LED的光谱图形和老化下光谱的变化趋势,光谱图形所反映的是LED器件所发出的蓝光和黄光的光功率分布,曲线所包含的面积是蓝光和黄光总辐射光功率. 如图3(a)所示,YAG封装的白光LED光谱可分为波长在420—496 nm范围的蓝光区域和波长在496—720 nm范围的黄光区域. 其中蓝光发光区域由LED芯片有源区发出,荧光粉发光区域则是有源区发出的部分蓝光激发YAG:Ce³⁺荧光粉而发出黄光,最后蓝光再与黄光混合使得器件发出白光. 图3(b)和(c)分别为室温和70 °C环境温度下的光谱变化曲线.

设白光LED老化前后的光功率分布函数分别为 $F = f(\lambda)$ 和 $H = h(\lambda)$, 则老化前后器件蓝光和黄光的输出光功率分别为

$$F_{\text{蓝光}} = \int_{420}^{496} f(\lambda) d\lambda,$$

$$F_{\text{黄光}} = \int_{496}^{720} f(\lambda) d\lambda;$$

$$H_{\text{蓝光}} = \int_{420}^{496} h(\lambda) d\lambda,$$

$$H_{\text{黄光}} = \int_{496}^{720} h(\lambda) d\lambda,$$

蓝光老化后的衰减幅度为 $\frac{F_{\text{蓝光}} - H_{\text{蓝光}}}{F_{\text{蓝光}}} \times 100\%$, 黄光

老化后的衰减幅度为 $\frac{F_{\text{黄光}} - H_{\text{黄光}}}{F_{\text{黄光}}} \times 100\%$.

表1 不同环境温度下通电2000 h后光谱衰减幅度对比表

温度/°C	蓝光衰减/%	黄光衰减/%	荧光粉转化效率衰减/%
室温	18	20	3
40	21	24	4
70	73	79	23

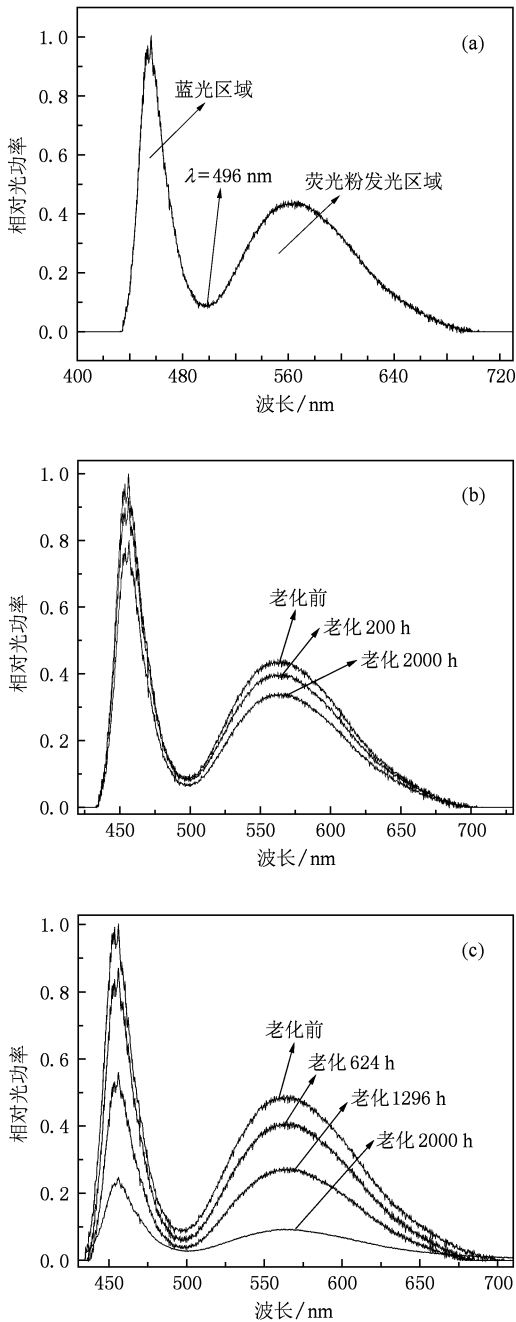


图3 LED光谱变化趋势 (a)光谱图,(b)室温下,(c)70 °C下

表1为依据上述公式推算出来的三个不同环境温度下LED发出的蓝光和黄光的衰减幅度.由于黄光是由蓝光激发YAG荧光粉发出的,不考虑封装材料老化前后对输出功率的影响(这里不考虑封装材料的影响来计算荧光粉的转化效率是为了便于定量分析),则黄光衰减为初始的百分比即为蓝光衰减为初始的百分比乘以荧光粉的转化效率;而黄光和蓝光部分的衰减依据实验测量的光谱图并通过上述积分公式计算而得,由此可以计算出荧光粉

的转化效率.从表1中可以看出荧光粉转化效率降低是导致白光LED衰减的一个部分;温度越高荧光粉的转化效率降低得也越快,从室温下工作2000 h后转化效率降低3%,70 °C下工作2000 h降低了23%.方福波等^[27]说明了高温是导致白光LED的YAG荧光粉转化效率降低的主要因素,这和我们的分析结果是一致的.

对于实际的LED器件其输出光功率的衰减主要包括芯片发光强度的衰减、封装材料的衰减和荧光粉的衰减.由图2可以看出老化过程中芯片由于衰退而导致的热阻变化相对较小,而封装材料高温下热阻迅速变大.此外,由表1可知,荧光粉的衰减要比黄光或蓝光的衰减小得多.综合这两方面因素,可知高温下LED器件的输出光功率迅速衰减主要是由于封装材料的迅速退化而引起的.如高温下不同材料之间出现断层,环氧树脂的黄化等.

3.4. 光通量和寿命

LED处于缓慢衰退时,输出光功率 P 随工作时间的变化用指数函数表示为^[28]

$$P = P_0 e^{-\alpha t}, \quad (7)$$

其中 P_0 和 α 分别为器件的初始输出光功率和衰退系数.

室温和两个加速温度下的输出光功率随工作时间的变化如图4所示,20 mA下器件的光功率由Ocean Optics光谱仪测量而得.从图中可以看出在室温和40 °C下器件的光功率随老化时间的变化相差不大.70 °C的环境温度下,工作700 h以后,器件的光功率随老化时间迅速降低,并在1300 h后降低到50%左右,这主要是由于高温导致芯片的串联电

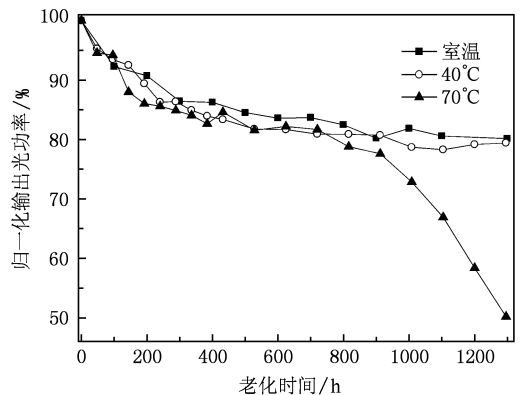


图4 室温、40 °C和70 °C下器件的归一化输出光功率随老化时间的变化

阻迅速增大,封装材料快速退化以及荧光粉在高温下的失效而引起的,这和上面的分析结果是一致的.由(7)式可得,LED 室温下的衰退系数 α 为 1.33×10^{-4} ,40 °C 和 70 °C 环境温度下的衰退系数分别为 1.56×10^{-4} 和 5.31×10^{-4} .

表 2 为两个加速温度下的实验结果,表中结温为老化温度(40 °C 或 70 °C)下 10 个样品测量值的平均值,寿命为光通量降为初始光通量 50% 的时间.

表 2 加速老化温度下的实验结果

环境温度 $T/^\circ\text{C}$	结温 T/K	衰退系数 $\alpha/10^{-4}$	寿命 t/h
40	345.96	1.56	4491
70	381.72	5.31	3560

温度加速老化下 LED 的寿命计算根据阿伦尼斯方程(Arrhenius)^[29]

$$t = t_0 \exp\left[\frac{E_a}{k}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right], \quad (8)$$

式中 t 和 T 分别为室温下器件的寿命和结温, t_0 和 T_0 则分别为某一加速温度下器件的寿命和结温, E_a 为器件激活能, k 为玻尔兹曼常数(8.62×10^{-5} eV).

实验中 LED 室温(25 °C)下的结温和器件的激活能分别为 328.92 K 和 0.388 eV.通过表 2 中的数据并利用(8)式得到器件室温下光通量降为原来 50% 的时间为 8818 h.

3.5. 老化实验结果对比

表 3 所示的是室温、40 °C 和 70 °C 温度下的实验结果对比,从表中的数据可以看出老化环境温度越大,器件的漏电流和热阻增加得越快;此外温度越高荧光粉的转换效率降低得越快.

表 3 加速实验结果对比表

测试项目	室温	40 °C	70 °C
1300 h 后,漏电流增量/ μA	0.002	0.005	0.021
1200 h 后,热阻增量/ $\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$	17	64	185
2000 h 后,荧光粉转换效率降低/%	3	4	23

4. 结 论

实验中,通过对 LED 器件老化前后的 I - V 特性和漏电流进行分析,结果表明器件在老化过程中欧姆接触退化、半导体材料的缺陷密度迅速增大;这导致了器件的串联电阻、反向漏电流和低正向偏压下的隧道电流变大.其次,对器件通电前后的热阻进行分析显示,高温下器件的热阻迅速增大,主要原因是封装材料膨胀系数不同而导致不同的材料在界面处发生断层的现象.此外,荧光粉高温下的光电转换效率迅速降低,由此降低了器件的光通量.

由此,对于小功率 GaN 基白光 LED 其主要失效机理有:1)欧姆接触的退化和材料缺陷密度的增加是老化过程中芯片衰退的主要因素;2)封装材料高温下的热退化以及材料之间发生断层是器件封装材料退化的主要原因;3)荧光粉的转化效率降低是器件衰退的又一因素;4)高温是加速整个器件退化的最重要原因.如表 3 所示,从表中的数据可以看出:室温下器件工作 1300 h 漏电流增大 0.002 μA ,1200 h 热阻增加 17 K/W,2000 h 荧光粉转换效率降低 3%;相应的 70 °C 环境温度下,漏电流增大 0.021 μA ,热阻增加 185 K/W,荧光粉转换效率降低 23%.

[1] Khan M A, Shatalov M, Maruska H P, Wang H M, Kuokstis E 2005 *Jpn. J. Appl. Phys.* **44** 7191
 [2] Bergh A, Craford G, Duggal A, Haitz R 2001 *Phys. Today* **55**44 42
 [3] Narendran N, Deng L, Pysar R M, Gu Y, Yu H 2004 *Proceedings of the Third International Conference on Solid State Lighting* 2003 San Diego, United States, August 5, 2003 p267
 [4] Trevisanello L, Meneghini M, Mura G, Vanzi M P, Meneghesso G, Zanoni E 2008 *IEEE Trans. Dev. Mater. Reliab.* **8** 304
 [5] Uddin A, Wei A C, Andersson T G 2005 *Thin Solid Films* **483** 378
 [6] Chen H T, Lü Y J, Chen Z, Zhang H B, Gao Y L, Chen G L 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5700 (in Chinese) [陈焕庭、吕毅军、

陈忠、张海兵、高玉琳、陈国龙 2009 *物理学报* **58** 5700]
 [7] Li B Q, Zheng T C, Xia Z H 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7189 (in Chinese) [李炳乾、郑同场、夏正浩 2009 *物理学报* **58** 7189]
 [8] Huang S R 2007 Ph. D. Dissertation (Xiamen: Xiamen University) (in Chinese) [黄生荣 2007 (博士学位论文)(厦门:厦门大学)]
 [9] Huang S R, Tian H T, Chen C 2007 *Chinese Lighting* **5** 83 (in Chinese) [黄生荣、田洪涛、陈朝 2007 *中国照明* **5** 83]
 [10] Huang S R, Chen C 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4596 (in Chinese) [黄生荣、陈朝 2007 *物理学报* **56** 4596]
 [11] Chen C, Tian H T 2006 *Chinese Patent* CN200310121093.5 (in Chinese) [陈朝、田洪涛 2006 中国发明专利 CN200310121093.5]

- [12] Xue Z Q, Huang S R, Zhang B P, Chen C 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1268 (in Chinese) [薛正群、黄生荣、张保平、陈朝 2010 物理学报 **59** 1268]
- [13] Osinski M, Zeller J, Chiu P C, Phillips B S 1996 *Appl. Phys. Lett.* **69** 898
- [14] Yang L, Ma X H, Feng Q, Hao Y 2008 *Chin. Phys. B* **17** 2696
- [15] Barton D L, Osinski M, Perlin P, Eliseev P G, Lee J 1999 *Microelectron. Reliab.* **39** 1219
- [16] Meneghesso G, Levada S, Zanoni E 2003 *Microelectron. Reliab.* **43** 1737
- [17] Li Y X, Min Y L, Zhou X Z, You X Z 2003 *Chinese J. Inorg. Chem.* **19** 1169 (in Chinese) [李永绣、闵宇霖、周雪珍、游效曾 2003 无机化学学报 **19** 1169]
- [18] Hu J Z, Yang L Q, Kim L, Shin M W 2007 *Semicond. Sci. Technol.* **22** 1249
- [19] Yu L S 2006 *Semiconductor Heterojunction Physics* (Beijing: Science Press) pp78,84 (in Chinese) [虞丽生 2006 半导体异质结物理 (北京:科学出版社) 第78,84 页]
- [20] Hu J Z, Yang L Q, Shin M W 2008 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **41** 1
- [21] Shi M 2004 *Physics and Technology of Semiconductor Devices* (Suzhou: Suzhou University Press) p93 (in Chinese) [施敏 2004 半导体器件物理 (苏州:苏州大学出版社) 第93 页]
- [22] Hsu C Y, Lan W H, Wu Y S 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 2447
- [23] Szekely V, Bien T V 1988 *Solid-State Electronics* **31** 1363
- [24] Rencz M, Poppe A, Kollar E 2005 *IEEE Trans. Compon. Pack T.* **28** 51
- [25] Osinski M, Barton D L, Perlin P, Lee J 1998 *J. Cryst. Growth* **189/190** 808
- [26] Fan C X 2006 *Advanced Display* **65** 11 (in Chinese) [范朝勋 2006 现代显示 **65** 11]
- [27] Fang F B, Wang Y H, Song D H, Xu B H 2008 *Chin J. Lumin.* **29** 353 (in Chinese) [方福波、王焱浩、宋代辉、徐彬海 2008 发光学报 **29** 353]
- [28] Yamakoshi S, Hasegawa O, Hamaguchi H, Abe M, Ymaoka T 1977 *Appl. Phys. Lett.* **31** 627
- [29] Zhao M, Zhang W S, Xu L S 2006 *Proceeding of the 10th National Seminar LED industry and academic conference Dalian, China, September 25—29, 2006* (in Chinese) [赵敏、张万生、徐立生 2006 第十届全国LED产业研讨与学术会议论文集 大连,中国,9月25—29日,2006]

Analysis of failure mechanism of GaN-based white light-emitting diode *

Xue Zheng-Qun¹⁾ Huang Sheng-Rong²⁾ Zhang Bao-Ping¹⁾³⁾ Chen Chao^{1)3)†}

1) (*Department of Physics, Xiamen University, Xiamen 361005, China*)

2) (*San An Electronics Corporation, Xiamen 361005, China*)

3) (*Center for Semiconductor Lighting of Fujian Province, Xiamen 361005, China*)

(Received 13 October 2009; revised manuscript received 25 November 2009)

Abstract

Accelerated aging and life-time tests at ambient temperatures of 40 °C, 70 °C and room temperature were carried out on GaN-based white light-emitting diodes (LEDs). The electrical, optical and thermal characteristics of the device were compared before and after different aging times in order to investigate the failure mechanism of the device. Here, we mainly analyzed the failure mechanism related with the chip and the phosphor of the LED. The current-voltage characteristics demonstrated that both the series resistance and the tunnel current increase under lower forward voltages after aging, which were due to the degradation of p-type ohmic contact and the increase of defect density. The thermal characteristics confirmed that the thermal resistance increased rapidly under high aging temperature. This was mainly attributed to the fracture of different materials inside the devices caused by the difference in thermal expansion coefficients. Optical measurements indicated that high aging temperature could accelerate the degradation of output power and reduce the conversion efficiency of the phosphor as well. Finally, the life time of the device was calculated using Arrhenius-equation, and the failure mechanism was analyzed.

Keywords: accelerated aging, failure mechanism, GaN, white light-emitting diode

PACC: 7280E, 8170C

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60476022) and the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2004AA311020).

† Corresponding author. E-mail: cchen@xmu.edu.cn