

基于电容和电导特性分析 GaN 蓝光 发光二极管老化机理*

陈焕庭 吕毅军[†] 陈 忠 张海兵 高玉琳 陈国龙

(厦门大学物理系, 福建省半导体照明工程技术研究中心, 厦门 361005)

(2008 年 9 月 7 日收到, 2009 年 1 月 21 日收到修改稿)

采用正向交流小信号方法测试和分析老化前后 GaN 发光二极管(LED)的电容-电压特性, 结合串联电阻、理想因子、隧穿电流参数讨论负电容以及电导变化情况. 基于 $I-V$ 曲线定性分析老化前后负电容的阈值电压, 老化之后样管的受主浓度降低, 辐射复合概率下降, 大量缺陷以及非辐射复合中心出现, 对载流子俘获作用增强, 造成负电容降低, 反向偏压以及小正向偏压下, 隧穿效应导致老化之后样管的电导增大, 正向偏压大于 2.2 V 区域, 考虑串联电阻效应, 老化后样管电导减小. 在分析 LED 电容-电压、光输出、电学特性曲线与老化机理基础上, 通过实验论证以及理论解释表明, 负电容以及电导特性可作为分析 LED 老化特性的参考依据.

关键词: GaN 发光二极管, 负电容, 电导, 老化机理

PACC: 7280E, 7340E, 7360J, 7865J

1. 引 言

很多研究已经证实, 发光二极管(LED)在老化过程中将导致芯片、封装、荧光粉区域失效^[1-3]. LED 老化实验条件普遍为施加电应力、热应力, 由于不同材料热膨胀系数之间差异和缺陷生长, 导致 LED 光通量的衰减^[4], 主要的老化机理包括暗点缺陷、金属合金迁移、组分变化等^[5-7]. 国内外不同的研究小组从各个角度定性地解释了半导体中负电容现象. Wu 等^[8]提出双能级的简化模型, 指出由于碰撞电离而使费米能级以下的占据界面电荷消失是造成二极管出现负电容的原因. Noguchi 等^[9]认为负电容与深能级的充放电效应有关. Jones 等^[10]认为负电容可能与半导体材料的弛豫现象有关. 谭延亮等^[11]指出发光二极管负电容现象是表象, 特定参数的可变电容使电流的相位移相 π , 使得测量中表现为负电容, 实际上不存在负电容. 曾志斌等^[12]认为发光二极管负电容现象主要原因是有源区内注入载流子的辐射复合, 但至今尚没有报道在老化过程中 LED 负电容以及电导性质研究. 本文利用正向交流小信号对老

化前后 GaN LED 的电容-电压特性进行了测试和分析, 观察经过老化之后负电容、电导变化情况, 并结合 $I-V$, $L-V$ 曲线对其物理机制进行了理论分析和实验论证.

2. 实 验

样品采用金属合金衬底 GaN LED, 该样品芯片制作工艺大致如下: 通过金属反射层以及 n-GaN 表面粗化工艺增加出光率, n 电极直接制作在 n-GaN 顶端, 保证有源层完整性, 与传统蓝宝石衬底 LED 相比, 具有更优越的出光能力. 金属合金衬底 LED 的电流路径从底面阳极垂直传输至顶面阴极区域, 垂直电流路径上串联电阻比蓝宝石衬底结构的横向电流路径低. 与 p-GaN 相比, n-GaN 具有高电导率以及电流扩散能力, 因此不需要制作电流扩展层, 从而减少光在电流扩展层中的吸收. 金属合金衬底具有高热导率, 可实现高电流输入下正常工作. 具体芯片结构如图 1 所示^[13]. 样品安装在老化台之上, 在样品底部与老化台散热片接触面均匀涂抹硅胶, 以减少界面热阻, 使 LED 产生的热量能及时传递至外

* 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2006AA03A175)、福建省科技重大专项 (批准号: 2006H0092) 和福建省自然科学基金 (批准号: 2008J0030) 资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: yjlu@xmu.edu.cn



图 1 金属合金衬底 LED 芯片结构

界环境中,加载 700 mA 正向恒定电流进行老化实验,时间为 1640 h.本文选取一典型样管的测试结果进行讨论.

p-n 结二极管等效电路可以看作是结电容 C 、结电导 G 和串联电阻 r_s 组成,如图 2(a)所示. C - V 法通常采用图 2(b)所示并联等效电路,其中 G_p 为表观电导, C_p 为表观电容.它们可分别表示为^[14]

$$G_p = \frac{\alpha(1 + r_s G) + r_s(\omega C)^2}{(1 + r_s G)^2 + (\omega r_s C)^2}, \quad (1)$$

$$C_p = \frac{C}{(1 + r_s G)^2 + (\omega r_s C)^2}, \quad (2)$$

式中 ω 为测试时加载的交流小信号角频率.利用 Agilent E4980A 型 LCR 并联等效测试电路测量表观

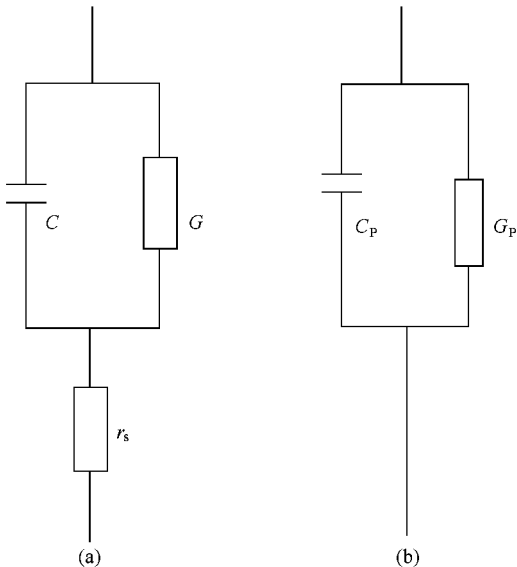


图 2 二极管的等效电路及测试电路 (a) p-n 结二极管的等效电路 (b) 并联模式的测试电路

电导 G_p 和表观电容 C_p .测试过程在直流偏压上叠加 50 mV 交流小信号,测试频率范围从 20 Hz 到 2 MHz.使用 YOKOGAWA GS610 型信号源测量 I - V 特性,测试电流范围从 1 nA 到 450 mA.用 MicRed 生产的 Teraled 测量老化前后光功率变化,电压范围为 1.8—3.4 V.以上测试步骤都通过 MicRed 生产的 Teraled 对待测器件采取控温措施,LED 热沉温度控制在 30 °C,避免器件温度变化对测试结果影响.

3. 结果与讨论

p-n 结电容由耗尽层电容和扩散电容组成,当 p-n 结反向偏压或加小正向偏压时,耗尽层电容起主导作用,而随正向偏压增大,扩散电容增长速度远远快于耗尽层电容,因此一般认为在较大正向偏压下 p-n 结电容主要表现为扩散电容.图 3 为老化前后样管在 20 Hz,1 kHz 和 1 MHz 频率下的 C - V 特性.随着频率降低、电压增大,负电容现象就更明显.当频率为 20 Hz 时,正向偏压大于 2.2 V 情况下,老化前后样管都不同程度地出现负电容现象,且老化后样管负电容增大速率小于老化前样管.如图 3 内插图所示,频率增至 1 kHz 时,老化前样管电容随电压增大而增大,当电压增至 2.4 V 时电容达到极大值,随后开始下降,电压增至 3 V 时电容呈现负值,而老化后样管正向偏压增至 2.8 V 时电容才达到极大值.频率为 1 MHz 时,老化前样管电容极大值对应电压值增至 2.7 V,而电压增至 3 V 时老化后样管电容仍未达到极大值.可以运用强复合模型理论^[15,16]解释老化前后负电容变化情况.随着正向电压增大,注入载流子越来越多,非辐射复合通道区域饱和,此时电流传输机制主要以辐射复合占主导,辐射复合迅速增强.因此,总电容可看作没有复合情况下的扩散电容 C_d 、耗尽层电容 C_l 和辐射复合引起的电容 C_r 的代数和.当正向电压增大到一定值后开始出现较强的复合发光,此时电容变为负值.在此过程的某段时间内复合掉的载流子 ΔQ_r 大于注入的载流子 ΔQ_d ,引起发光有源区注入载流子总量为负增长,使得电容值也变为负值.经过老化之后由于受主浓度降低,辐射复合率降低,出现大量缺陷以及非辐射复合中心,对载流子有较强俘获作用,因此老化后样管负电容小于老化前样管.在老化过程中,半导体与电极金属之间发生金属合金扩散,由于电子迁移以及金属之间反应在界面层区域可观察到空洞形成以及

晶须生长^[17] 欧姆接触变大,致使电流拥挤效应更加明显,接触电阻增大,产生辐射复合阈值电压增大.因此,老化后样管的电容极大值以及负电容阈值电压都高于老化前.

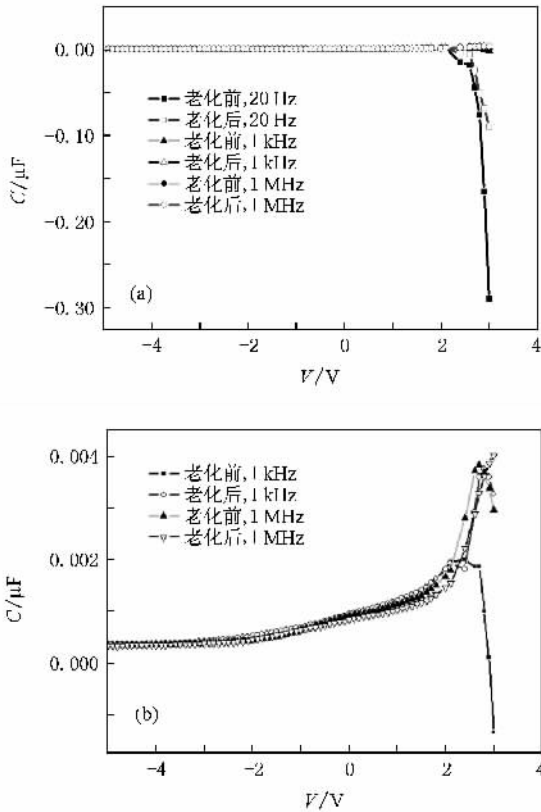


图3 在20 Hz, 1 kHz和1 MHz频率下老化前后LED的C-V曲线
(b)为(a)的局部放大

经过老化之后 LED 器件内部结构都将不同程度劣化,势必引起光输出特性变化.老化前后样管正向偏压与输出光通量 L 的关系如图4所示.老化前后样管发光时的阈值电压与图3中产生负电容的阈值电压基本一致,再次说明负电容与复合发光存在紧密的联系.在相同电压下,老化后样管的光通量明显下降,说明在注入相同载流子数量情况下老化后样管发生辐射复合载流子数量降低,再次表明老化后样管的负电容降低.通过C-V以及L-V实验论证,依据强复合模型理论能够合理解释老化前后负电容产生以及变化现象.

图5为在偏置电压为-3 V条件下,老化前后样管的电容 C 与频率 F 的关系.从图5可以看出,随着频率升高,电容降低,且老化后样管电容下降趋势更为明显.在反向偏压时, p-n 结电容主要由耗尽层电容决定,将待测器件当作 $n^+ - p$ 突变结简化模型处理.

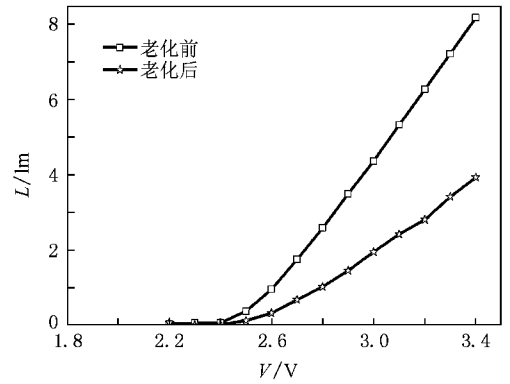


图4 老化前后样管的L-V曲线

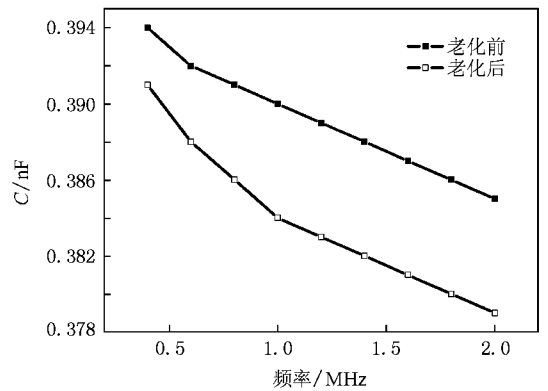


图5 在偏置电压为-3 V条件下老化前后样管的C-F曲线

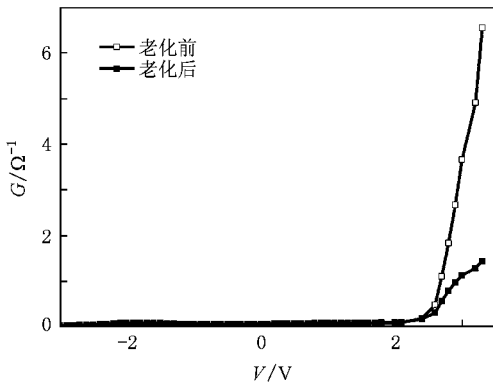
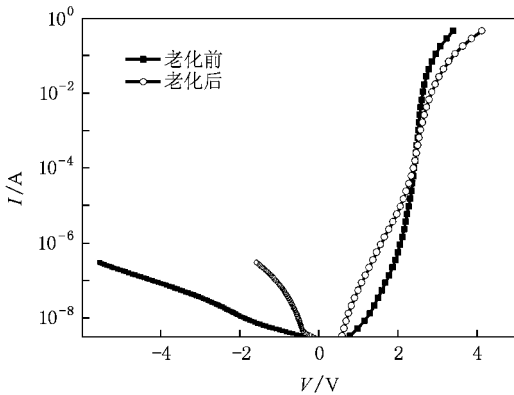
$$C = \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_b}{\chi V_{bi} - V}} \quad (3)$$

式中, ϵ_s 为待测器件介电常数, V_{bi} 为内建电势, N_b 为轻掺杂区 p 型载流子浓度. 经过老化之后, 出现较多螺旋位错, 产生漏电通道以及施主缺陷 n 空位形成增多, 而 Mg-H 浓度较低制约受主浓度的增加, 从而使非辐射复合中心增加, 使得电容降低.

根据 LED 电流传输机理, 电导 G 可由下式表示:

$$G = \frac{dI}{dV} = \frac{q}{nk_B T} I_s \exp\left(\frac{qV}{nk_B T}\right) \approx \frac{q}{nk_B T} (I + I_s) \quad (4)$$

当 LED 反向偏压大于几个 $nk_B T/q$ 时, 反向偏压 $I-V$ 特性出现饱和, $I \rightarrow I_s$, 则电导趋于零. 图6为在1 MHz 频率下, 老化前后电导与电压的关系. 老化前后样管处于反向偏压以及小正向偏压情况下, 存在一个很小的电导分量, 当正向偏压大于 2.2 V 时, 电导开始急剧增大. 依据图7中 $I-V$ 曲线斜率变化趋势,

图6 在 1 MHz 频率下老化前后样管的 $G-V$ 曲线图7 老化前后样管的 $I-V$ 曲线

可分为如下三个区域(1)低压区($V < 2.1$),利用该区域 $I-V$ 数据拟合计算样管势垒能^[18],该参数可反映器件在有源区界面隧穿能力的强弱.老化前样管的势垒能 $E = 226$ meV,老化后样管的势垒能 $E = 175$ meV,老化后螺旋位错增多,势垒能降低,使耗尽层载流子在陷阱能级中隧穿电流增大.(2)中压区($2.1 < V < 2.6$),老化前样管理想因子为 1.9,介于 1

与 2 之间,说明电流传输为扩散-复合机理.老化后样管的理想因子为 4.3, $p-n$ 结隧穿效应是老化后样管理想因子偏大的原因^[19].(3)高压区($V > 2.6$),从 $I-V$ 曲线斜率变化趋势可知,经过老化之后串联电阻增大.

老化前后样管在反向偏压和低正向偏压范围内,电流传输机制以隧穿电流为主,在正向偏压小于 2.2 V 时,正向电流主要以隧穿电流以及扩散-复合电流为主,扩散-复合电流随正向偏压增加而呈指数增加.如图 7 所示,当加载电压大于 2.2 V 时,老化前后样管电流开始呈指数迅速递增.老化之后,串联电阻增大,在相同偏压条件下老化后样管电流变化比老化前小,所以老化之后电导变小.而在反向偏压以及小正向偏压下,经过老化之后隧穿电流增大,从而可解释老化之后电导增大的实验现象.通过上述分析表明,利用电导特性可说明 LED 的老化机理变化.

4. 结 论

采用正向交流小信号法测量老化前后金属合金衬底 GaN LED 的电容-电压特性,测试频率越低、正向电压越大,负电容现象越明显.结合 $I-V$ 和 $G-V$ 曲线并运用强复合模型理论论证复合发光与负电容紧密联系,老化后样管受主浓度降低,辐射复合概率下降,出现大量缺陷以及非辐射复合中心,产生漏电通道,对载流子俘获能力增强,致使负电容降低.结合 $I-V$ 和 $G-V$ 曲线,在反向偏压以及小正向偏压下,由于隧穿效应导致老化后样管电导增大,而在正向偏压大于 2.2 V 时,由于串联电阻增大导致老化后样管电导减小.通过本文实验论证以及理论分析表明,负电容以及电导变化特性可作为分析 LED 老化特性的参考依据.

[1] Narendran N, Gu Y, Freyssonier P J, Yu H, Deng L 2004 *J. Cryst. Growth.* **268** 449
 [2] Cao X A, Arthur S D 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 3971
 [3] Pursiainen O, Linder N, Jaeger A, Oberschmid R, Streubel K 2001 *Appl. Phys. Lett.* **79** 2895
 [4] Sauvage D, Laffitte D, Perinet J, Bertier P H, Goudard J L 2000 *Microelectron. Reliab.* **40** 1701
 [5] Egawa T, Jimbo T, Umeno M J 1997 *Appl. Phys.* **82** 5816
 [6] Cao X A, Arthur S D 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 3971
 [7] Yu T J, Shang S P, Chen Z Z, Qin Z X, Lin L, Yang Z J, Zhang G Y 2007 *J. Lumin.* **122** 696

[8] Wu X, Yank S, Evans H L 1990 *J. Appl. Phys.* **68** 2845
 [9] Noguchi T, Kitagawa M, Taniguchio I 1980 *Jpn. J. Appl. Phys.* **19** 1423
 [10] Jones B K, Santana J, Mcpherson M 1998 *Solid State Commun.* **105** 547
 [11] Tan Y L, You K M, Chen L Z, Yuan H Z 2007 *Chin. J. Semicond.* **28** 741 (in Chinese) [谭延亮、游开明、陈列尊、袁红志 2007 半导体学报 **28** 741]
 [12] Zheng Z B, Zhu C Y, Li L, Zhao F, Wang C D 2004 *J. Optoelectron. Laser* **15** 402 (in Chinese) [曾志斌、朱传云、李乐、赵峰、王存达 2004 光电子·激光 **15** 402]

- [13] Tran C A , Chu C F , Cheng C C , Liu W H , Chu J Y , Cheng H C , Fan F H , Yen J K , Doan T 2007 *J. Cryst. Growth* **298** 722
- [14] Feng L F , Li D , Zhu C Y , Wang C D , Cong H X , Zhang G Y , Du W M 2007 *J. Appl. Phys.* **102** 094511
- [15] Feng L F , Zhu C Y , Chen Y , Zeng Z B , Wang C D 2006 *J. Optoelectron. Laser* **17** 5 (in Chinese) [冯列峰、朱传云、陈永、曾志斌、王存达 2006 光电子·激光 **17** 5]
- [16] Feng L F , Wang C D , Cong H X , Zhu C Y , Wang J , Xie X S , Lu C Z , Zhang G Y 2007 *IEEE J. Quantum Electron.* **43** 458
- [17] Chen L C , Hsu C Y , Lan W H , Teng S Y 2003 *Solid-State Electron.* **47** 1843
- [18] Cao X A , Stokes E B , Sandvik P M , Leboeuf S F , Kretchmer J , Walker D 2002 *IEEE Electron. Device Lett.* **23** 535
- [19] Dumin D J , Pearson G L 1965 *J. Appl. Phys.* **36** 3418

Analysis of degradation mechanism of GaN blue light emitting diode by the characteristics of capacitance and conductance^{*}

Chen Huan-Ting Lü Yi-Jun[†] Chen Zhong Zhang Hai-Bing Gao Yu-Lin Chen Guo-Long

(*Engineering Research Center for Solid-State Lighting of Fujian Province , Department of Physics , Xiamen University , Xiamen 361005 , China*)

(Received 7 September 2008 ; revised manuscript received 21 January 2009)

Abstract

A study of the capacitance-voltage characteristics of GaN light emitting diode (LED) with a view to reveal its degradation mechanism is presented in this article by forward alternating current small-signal method. Combined with series resistance , ideality factor and tunneling current measurement , the properties of negative capacitance and conductance are discussed. The threshold voltage of negative capacitance during degradation is qualitatively analysed. The decreased negative capacitance during aging may be due to the decrease in the effective acceptor concentration and radiative recombination rate , and the increase of defects and non-radiative recombination centers resulting in the enhanced capture effect of carriers . The tunneling effect leads to the obvious increase of conductance under reversed and low-forward bias voltage. The decreased conductance during aging may be due to the series resistance. On the basis of the capacitance-voltage characteristic , light output , current-voltage curves with the degradation mechanism of LED , the characteristics of negative capacitance and conductance can be used as important evidence for the degradation analysis of LED as proved by experiment and theory .

Keywords : GaN light emitting diode , negative capacitance , conductance , degradation mechanism

PACC : 7280E , 7340E , 7360J , 7865J

^{*} Project supported by the National High Technology Development Program of China (Grant No. 2006AA03A175) , the Special Foundation for Major Program of Science and Technology of Fujian Province , China (Grant No. 2006H0092) and the Natural Science Foundation of Fujian Province , China (Grant No. 2008J0030) .

[†] Corresponding author. E-mail : yjlu@xmu.edu.cn