

功率型 GaN 基发光二极管芯片表面温度及亮度分布的物理特性研究*

陈焕庭¹⁾ 吕毅军^{2)†} 高玉琳^{2)‡} 陈忠²⁾ 庄榕榕¹⁾ 周小方¹⁾ 周海光¹⁾²⁾

1) (漳州师范学院物理与电子信息工程系, 漳州 363000)

2) (厦门大学电子科学系, 福建省半导体照明工程技术研究中心, 厦门 361005)

(2011年11月29日收到; 2012年1月16日收到修改稿)

基于电流连续方程、欧姆定律及定性三维热传导模型研究发光二极管 (LED) 芯片的电流密度分布、热量、温度之间的相互交叉关系, 进而测试分析 GaN 基蓝光 LED 电流扩展效应和亮度分布的关系, 认为芯片亮度变化趋势可作为判别电流扩展性能的有效手段. 由于芯片表面温度、亮度分布和电流密度之间存在紧密的联结关系, 通过测试芯片表面温度或亮度分布就可定性了解器件电流扩展性能, 从而为优化电极结构提供一种判定依据. 在不同电流和热沉温度下, 进一步讨论了电流密度非均匀性和亮度分布的关系, 电流密度拥挤将导致芯片局部区域热量堆积, 非辐射复合作用增强, 限制出射光子数目, 因此热量是影响亮度分布的重要因素之一. 通过载流子传输机理进一步说明温度影响亮度均匀性的原因, 并通过实验说明理论分析的可行性. 通过优化电极结构能改善器件的电流扩展效应以及亮度均匀性, 对提高大功率 LED 的可靠性具有重要作用.

关键词: 发光二极管, 电流扩展, 亮度均匀性, 温度分布

PACS: 71.20.Mq, 73.40.Vz, 74.25.Fg, 74.25.Gz

1 引言

GaN 基发光二极管 (LED) 衬底一般采用绝缘蓝宝石, 在不剥离衬底情况下, 其 p 型和 n 型欧姆接触电极只能制作在外延片表面的同一侧. 因此在实际器件内部, 经过不同路径传输的横向电流将导致电流拥挤^[1], 热流聚集在器件内部无法及时传导至外界^[2], 发光效率降低, 峰值波长红移, 荧光粉转换效率降低^[3], 进而直接影响器件的可靠性. 如何解决电流均匀扩展一直是国内外研究者关注的问题. 沈光地等^[4]比较了不同电极结构芯片表面温度与电流扩展的关系, 发现经过优化的环形叉指电极结构的 GaN 基大功率 LED 表面温度分布较为均匀. 通过有限元方法计算 LED 中电流三维空间

分布, 潘华璞等^[5]定量比较了不同电极结构, 发现当 LED 串联电阻为最小值时又指电极结构的优化参数. 通过计算 LED 电流密度分布和顶层厚度的关系, 邓云龙等^[6]发现顶层厚度对器件光电特性具有明显的影响. 基于包含电阻和内部二极管的三维电路模型, Hwang 和 Shim^[7]分析了 InGaN/GaN 多量子阱 LED 的电流扩展效应, 讨论了电极结构、出光均匀性、输出功率饱和度以及器件可靠性之间的相互交叉关系. Guo 和 Schubert^[8]建立了电流传输模型, 定量分析了电流密度与扩展长度的关系, 并发现光功率饱和度与器件的电极结构具有紧密连接关系. 采用电流扩展二维解析模型, Kim 等^[9]分析了 LED 中各层材料的电导对电流扩展的影响, 通过降低在电流传输层中的横向电流路径可提高 LED 的电学、光学特性以及可靠性. 目前各研

* 福建省科技计划重点项目 (批准号: 2011H0021, 2012H0039)、福建省科技项目 (批准号: 2011H6025)、福建省自然科学基金 (批准号: 2011J05162)、福建省教育厅 A 类科技项目 (批准号: JA11175) 和漳州师范学院科学研究资助项目 (批准号: SJ1017) 资助的课题.

† E-mail: yjlu@xmu.edu.cn

‡ E-mail: ylgao@xmu.edu.cn

究小组主要是通过电流传输理论模型以及温度分布, 分析 LED 电流扩展效应. 然而如何通过亮度、温度均匀性与电流扩展效应之间的关系, 分析比较 GaN 基 LED 电流扩展效应, 仍缺少相关研究. 本文在不同电流以及温度条件下, 测试 GaN 基 LED 芯片表面亮度和温度场分布, 定性分析电流和温度对电流拥挤效应的影响, 讨论电流扩展效应和亮度分布的关系, 从而建立判别电流扩展性能的有效测试方法.

2 理论分析

基于电流连续方程以及欧姆定律可获得 LED 芯片内部的电流密度分布:

$$\nabla \cdot \mathbf{J}(r) + \frac{\partial n}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

$$\mathbf{J}(r) = -\sigma \cdot \nabla \varphi, \quad (2)$$

其中 $\mathbf{J}(r)$ 为电流密度分布函数, 该函数以位置 r 为变量; $\frac{\partial n}{\partial t}$ 为载流子浓度变化量; σ 为材料电导率; $\nabla \varphi$ 为电势梯度. LED 电学模型可简化为由理想二极管与串联电阻 R_s 组成, 串联电阻 R_s 包括外延层体电阻、衬底电阻、接触电阻. 通常情况下电流-电压特性曲线可划分为三个区域: 低压区、中压区以及高压区^[10]. 在正向低电压与反向电压区域内温度对电流-电压关系影响很小, 认为该区域载流子传输机理为隧穿效应, 随着电流增大, 在中电压区扩散和复合电流作用开始强于隧穿电流. 正向载流子传输可由复合-扩散模型表示:

$$J = J_s \exp\left(\frac{eV_i}{nkT}\right), \quad (3)$$

其中 J 为电流密度, J_s 为饱和电流密度, V_i 为正向电压, n 为理想因子, k 为玻尔兹曼常数, T 为绝对温度; $n = 1$ 说明载流子输运主要为扩散电流, $n = 2$ 则载流子主要输运为复合电流, 若 n 介于 1—2 之间, 则载流子输运为扩散-复合模型. 与低电压区域不同, 该区域电流-电压随温度变化而变化. 需要指出在低电压及中电压区域, 器件的正向电流很小, 因此近似忽略串联电阻的压降. 而在高电压区域, 器件的正向电流随电压的增加变化幅度明显, 需要考虑串联电阻效应, 因此 pn 结的电学模型可简化为

$$V_i = \rho_a d_a J(r) + V_0, \quad (4)$$

式中 ρ_a 为有源层的电阻率, d_a 为有源层厚度, V_0 为常数.

LED 器件内部三维热流传导方程可由下式表示

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (K \nabla T) + q, \quad (5)$$

式中 C 为比热容, K 为热导率, q 为有源层产生的热流. 当器件内部热流与外界达到热平衡状态情况时, (5) 式可简化为

$$\nabla \cdot (K \nabla T) + q = 0. \quad (6)$$

一般情况下, 热流 q 主要由以下三部分构成^[11].

1) 有源层内部非辐射复合以及自发辐射吸收产生的热量 q_a ^[12]:

$$\begin{aligned} q_a &= \frac{V_i J(r)}{d_a} (1 - \eta_{\text{int}}) + \frac{V_i J(r)}{d_a} \eta_{\text{int}} (1 - f_{\text{sp}}) \\ &= \frac{V_i (1 - \eta_{\text{int}} f_{\text{sp}})}{d_a} J(r), \end{aligned} \quad (7)$$

式中 η_{int} 为内量子效率, f_{sp} 为自发辐射光子的溢出系数, 该系数与芯片的几何形状参数相关^[13], 将 (4) 式代入 (7) 式, 有源层区域热流可简化为

$$q_a = \left[\rho_a J^2(r) + \frac{V_0 J(r)}{d_a} \right] (1 - \eta_{\text{int}} f_{\text{sp}}). \quad (8)$$

2) p-GaN 层产生的焦耳热

$$q_J = \frac{J^2(r)}{\sigma}. \quad (9)$$

3) p-GaN 层与电流扩展层之间欧姆接触产生的焦耳热 q_c

$$q_c = \frac{J^2(r) \rho_c}{t_c}, \quad (10)$$

式中 t_c 为合金层厚度, ρ_c 为 p 型接触电阻. 结合 (6)—(10) 式, 总热量 q 以及温度 T 可由下式表示:

$$\begin{aligned} q &= q_a + q_J + q_c \\ &= \left[\rho_a J^2(r) + \frac{V_0 J(r)}{d_a} \right] (1 - \eta_{\text{int}} f_{\text{sp}}) \\ &\quad + \frac{J^2(r)}{\sigma} + \frac{J^2(r) \rho_c}{t_c}, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (K \nabla T) &= \left[\rho_a J^2(r) + \frac{V_0 J(r)}{d_a} \right] (1 - \eta_{\text{int}} f_{\text{sp}}) \\ &\quad + \frac{J^2(r)}{\sigma} + \frac{J^2(r) \rho_c}{t_c}. \end{aligned} \quad (12)$$

上述模型将器件内部热流、温度以及电流密度联系为一体, 三者相互交叉关系由诸多复杂因素所制约, 如材料电导率、有源层的电阻率、厚度、内量子效率等. 因此本文通过测试 GaN 基 LED 芯片表面亮度和温度场分布, 定性分析电流和温度对电流拥挤效应的影响.

3 实验

样品采用典型 GaN 基蓝光 LED, 芯片面积为 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$, 该样品芯片通过在蓝宝石衬底蒸镀合金反射层增加出光率, 芯片结构如图 1 所示. 蓝宝石衬底 LED 的横向电阻大, 导致在电极焊盘附近的电流密度大, 电流拥挤效应明显. 因此样品采用铟锡氧化物 ITO 电流扩展层以及叉指状电极结构起到优化电流密度分布作用. 样品底部涂抹导热硅胶紧贴于 LED-850 温度控制仪, 通过调节 LED-850 的热沉温度就可间接控制器件的温度, 本实验中热沉温度设定为 25, 50, 80 °C 三个温度点. 采用 LumiCam 1300c 型亮度计测量样管芯片表面亮度分布, 其测试范围为 $0.02\text{--}2 \times 10^5\text{ cd/m}^2$, 分辨率为 1280×1000 像素, 因此 LED 加载电流不能过大, 否则亮度超出测试范围, 将导致测试结果有误. 本实验中实验电流选取 50, 100, 150 mA 三个电流值, 由 KEITHLEY2400 型数字源提供恒流驱动. 采用 Research-N2 型红外热像仪测温样管芯片表面温度分布, 其测试范围为 $-20\text{--}300\text{ °C}$, 温度精度为 0.08 °C , 分辨率为 320×240 像素. 测试温度之前, 先通过 LED-850 型温度控制仪控温以及 T3Ster 瞬态热阻测试仪器确定待测样品表面的发射率 [14].

本文选取一典型样管的测试结果进行讨论.

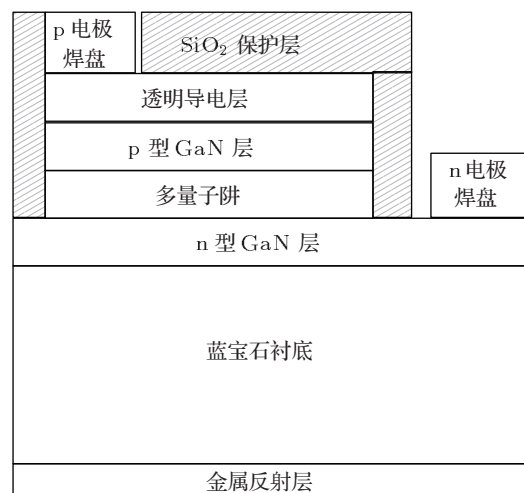


图 1 GaN 基蓝光 LED 芯片结构

4 结果与分析

控制待测器件的热沉温度为 25 °C, 加载电流为 50 mA, 芯片表面亮度分布如图 2 所示. 为了分析芯片表面亮度分布情况, 引入亮度均匀度正反向区间的定义:

$$\Delta L_+ = \frac{\text{最大亮度值}(L_1, L_2, L_3, \dots, L_n) - \text{平均亮度值}(L_1, L_2, L_3, \dots, L_n)}{\text{平均亮度值}(L_1, L_2, L_3, \dots, L_n)} \times 100\%, \quad (13)$$

$$\Delta L_- = \frac{\text{最大亮度值}(L_1, L_2, L_3, \dots, L_n) - \text{平均亮度值}(L_1, L_2, L_3, \dots, L_n)}{\text{平均亮度值}(L_1, L_2, L_3, \dots, L_n)} \times 100\%. \quad (14)$$

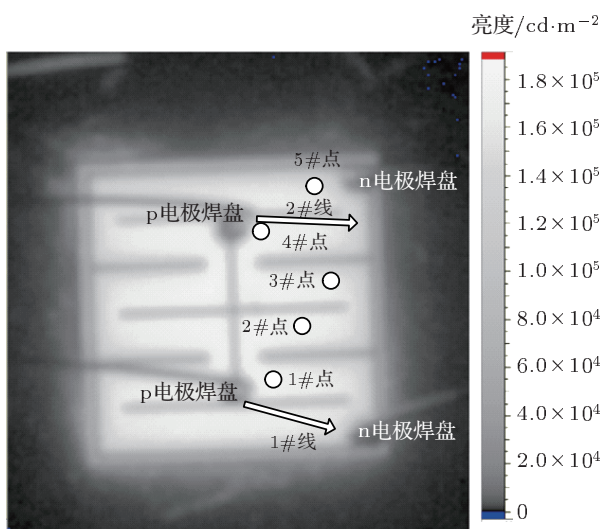


图 2 芯片表面亮度分布轮廓图

若正反区间范围越大, 则说明亮度均匀度越差. 在芯片电极之间选取 5 个不同位置测试点, 亮度均匀度正反区间为 $[6.63\%, -9.34\%]$. 由于金属电极本身透光率低, 表面亮度低, 在图 2 中可清楚看到电极表面以及焊盘附近亮度较暗, 其他区域材料为透光率高的电流扩展层以及二氧化硅保护层, 其表面亮度明显高于电极区域, 某些局部区域亮度也受晶体质量、表面形貌、点缺陷因素的影响. 随着加载电流变大, 芯片表面电流扩展效应就较为明显, 因此当待测器件的加载电流为 900 mA 时, 其表面温度分布如图 3 所示. 在 n 型电极焊盘附近的温度较高, 而 p 型电极焊盘的温度较低, 说明在大电流注入条件下芯片的电流扩展并不均匀.

电流由 p 电极流向 n 电极, 在 p 电极区域边缘温度较低, 亮度高. 而在其他区域由于电流分散地

流向 n 电极区域, 使得该区域电流密度较小, 亮度较低. 一般台阶电极结构的器件在工作过程中, n 电极焊盘附近电流密度较高, 随着电流增大, 该区域温度上升幅度高于其他区域, 使该部分有源区非辐射复合增加, 当温度升高到一定数值时, 容易导致器件失效. 为避免电流拥挤问题, 本文样品采用叉指状电极结构, 器件接通电流后, 电流从 p 电极上不同点按各自最小电流路径流向 n 电极或焊盘区域, 这样最大限度地实现电流扩展, 芯片表面亮度分布更加均匀, 避免了因电流拥挤问题而产生过多热量, 影响器件正常工作.

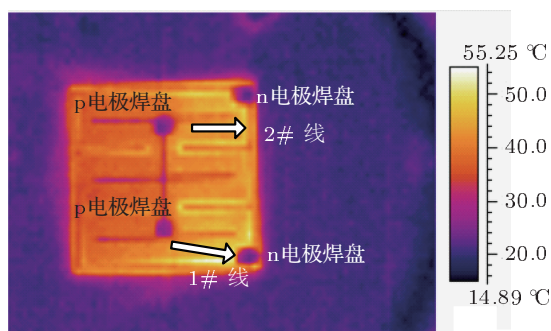


图3 芯片表面温度分布示意图

为了说明温度与亮度分布之间存在紧密关系, 在测试芯片 p 电极焊盘边缘选取两条线段 (如图 2 和图 3 所示), 两条线段上亮度变化趋势如图 4 所示, 亮度随着与 p 电极间距离增加而减弱, 与温度分布变化趋势相反. 由此可说明依据芯片亮度变化趋势可作为判别电流扩展性能的有效手段. 随着加载电流增大, 电流扩展性能的优劣将得到体现, 因此通过改变加载电流大小, 定性讨论不同电流对亮度均匀性影响. 如图 5 和图 6 所示为加载不同电流下两条线段上亮度和温度分布. 本文中芯片表面温度与亮度之间的关系与 Gärditz 等^[15]所报道的结论基本符合. 从图 6 可知随着电流升高, 由于电流拥挤而使热量聚集, 温度梯度变大. 当热沉温度为 80 °C, 加载电流为 50 mA 时, 由于电流密度小, 扩展性较好, 2# 线亮度均匀度正反区间为 [5.01%, -13.1%]. 而当加载电流升高至 100 mA 时, 电流密度增大, 温度梯度变大, 亮度均匀度正反区间扩大为 [6.04%, -14.7%], 亮度正反区间范围越大, 则说明亮度均匀度越差. 随着电流增大, p 电极边缘亮度分布范围变大. 通过改变待测器件热沉温度, 观察亮度均匀性的变化情况, 实验结果如图 7 所示. 从图 7 可观察到, 随着热沉温度升高, 两条

线段上亮度均匀度变差. 当加载电流为 50 mA、热沉温度为 25 °C 时, 2# 线亮度均匀度正反区间为 [0.44%, -8.84%], 亮度正反区间为 9.29%. 电流保持不变, 将热沉温度升高至 80 °C, 亮度均匀度正反区间则为 [6.01%, -13.1%], 亮度均匀度范围为 19.1%. 由于电流密度拥挤导致芯片局部区域热量堆积, 内量子效率降低, 非辐射复合作用增强, 限制溢出光子数目, 因此芯片产生的热量是影响亮度分布的重要因素之一. 通过结合芯片表面亮度与温度分布的测试, 可为优化电极结构、改善电流扩展性能提供一种定性判定依据.

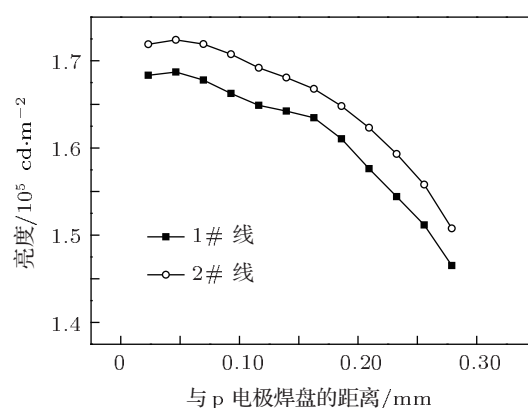


图4 芯片表面不同区域的亮度变化趋势

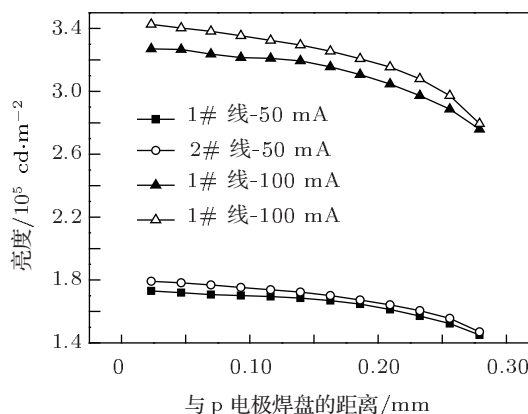


图5 加载不同电流下两条线段的亮度变化趋势

影响芯片温度的因素主要有晶格散射和电离杂质散射两种机理^[16]. 本文依据载流子传输机理, 解释温度对亮度均匀性影响的可能原因. 若散射机理以电离杂质散射为主, 温度升高, 载流子迁移率随之升高. 若晶格散射占据主导作用, 且随着温度升高而加剧, 此时迁移率随温度升高而降低. 待测样品的 p 型 GaN 层的受主浓度比 n 型 GaN 层的施主浓度高, 因此 p 型 GaN 层的散射中心数较高, 电

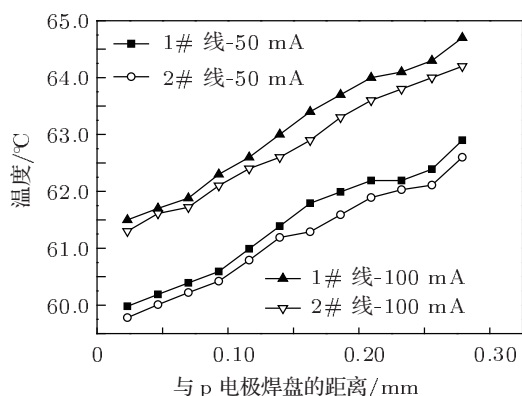


图6 加载不同电流下两条线段的温度变化趋势

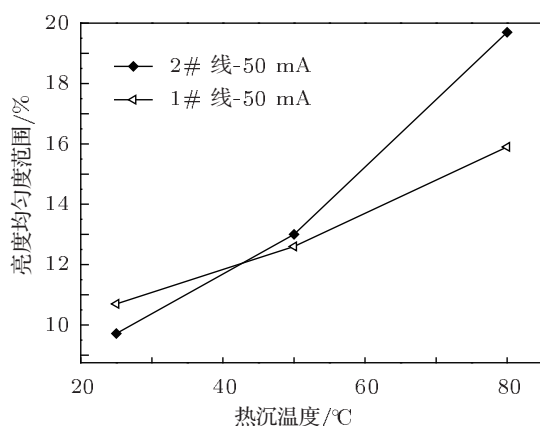


图7 在不同热沉温度下两条线段亮度均匀度范围变化趋势

离杂质散射作用较强. 因此与 n 型 GaN 层相比, p

型 GaN 层的迁移率随温度升高而降低的幅度较慢. 依据电阻率与载流子迁移率成反比关系, 随着温度升高 p 型 GaN 层的电阻率降低幅度比 n 型 GaN 层的电阻率小, 致使电流扩展长度减短, 电流拥挤问题更为明显. 如图 7 所示, 随着热沉温度的升高, 亮度正反区间范围变大, 则说明亮度均匀度变差, 实验结果与分析的原因基本符合.

5 结论

本文基于电流连续方程、欧姆定律及定性三维热传导模型研究 LED 芯片的电流密度分布、热量、温度之间的相互交叉关系, 通过结合 GaN 基蓝光 LED 芯片表面亮度与温度分布测试, 分析了温度、亮度分布和电流密度之间的关系, 为优化电极结构、改善电流扩展性能提供一种定性判定依据. 讨论了 GaN 基蓝光 LED 的电流密度扩展效应与表面亮度分布的关系, 结果表明电流密度和电流有效扩展长度对亮度分布有很大影响. 芯片表面亮度随着与 p 型电极距离增加而减弱, 亮度随着温度升高而降低. 利用载流子传输机理做定性分析, 进一步说明温度对亮度均匀性的影响, 并通过实验说明其理论分析的可行性. 改善电极结构可作为提高电流扩展效应以及亮度均匀性的方法之一, 对提高大功率 LED 可靠性具有重要作用.

- [1] Kim H S, Lee J M, Huh C, Kim S W, Kim D J, Park S J, Hwang H S 2000 *Appl. Phys. Lett.* **77** 1903
- [2] Chen H T, Tao X H, Hui S Y R 2012 *IEEE Trans. Power Electron.* **27** 2176
- [3] Li P L, Wang Z J, Yang Z P, Guo Q L 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 047804 (in Chinese) [李盼来, 王志军, 杨志平, 郭庆林 2011 物理学报 **60** 047804]
- [4] Shen G D, Zhang J M, Zou D S, Xu C, Gu X L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 472 (in Chinese) [沈光地, 张剑铭, 邹德恕, 徐晨, 顾晓铃 2008 物理学报 **57** 472]
- [5] Pan H P, Huang L W, Li R, Lin L, Chen Z Z, Zhang G Y, Hu X D 2007 *Chin. J. Lumines.* **28** 114 (in Chinese) [潘华璞, 黄利伟, 李睿, 林亮, 陈志忠, 张国义, 胡晓东 2007 发光学报 **28** 114]
- [6] Deng Y L, Liao C J, Liu S H, Fan G H, Wen S S 2002 *Chin. J. Lumines.* **23** 255 (in Chinese) [邓云龙, 廖常俊, 刘颂豪, 范广涵, 文尚胜 2002 发光学报 **23** 255]
- [7] Hwang S, Shim J 2008 *IEEE Trans. Electron Dev.* **55** 1123
- [8] Guo X, Schubert E F 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 3337
- [9] Kim H, Park S J, Hwang H 2002 *Appl. Phys. Lett.* **77** 1903
- [10] 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]
- [11] Huang S J, Wu H, Fan B F, Zhang B J, Wang G 2010 *J. Appl. Phys.* **107** 054509
- [12] Zhao Y G, Mcinerney J G 1996 *IEEE J. Quantum Electron.* **32** 1950.
- [13] Zhang Y Y, Fan G H 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 078504 (in Chinese) [张运炎, 范广涵 2011 物理学报 **60** 078504]
- [14] Chen H T, Gao Y L, Lu L J, Chen G L, Chen Z 2012 *Heat Transfer Engineering* **33** 255
- [15] Gärditz C, Winnacker A, Schindler F, Paetzold R 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 103506
- [16] Li B Q, Liu Y H, Feng Y C 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 477 (in Chinese) [李炳乾, 刘玉华, 冯玉春 2008 物理学报 **57** 477]

The physical characteristic study on luminance uniformity and temperature for power GaN LEDs chip*

Chen Huan-Ting¹⁾ Lü Yi-Jun^{2)†} Gao Yu-Lin^{2)‡} Chen Zhong²⁾
Zhuang Rong-Rong¹⁾ Zhou Xiao-Fang¹⁾ Zhou Hai-Guang¹⁾²⁾

1) (*Department of Physics and Electronic Information Engineering, Zhangzhou Normal University, Zhangzhou 363000, China*)

2) (*Fujian Engineering Research Center for Solid-State Lighting, Department of Electronic Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China*)

(Received 29 November 2011; revised manuscript received 16 January 2012)

Abstract

In this paper, we study the relationship among current density distribution, heat and temperature based on current continuity equation, ohm law and three-dimensional heat transfer model. The relationship between luminance distribution and current spreading of GaN blue light emitting diode (LED) is studied. Luminance distribution is proved to be an effective method of distinguishing the performance of current spreading. Because of the close relationship among temperature, luminance distribution and current density, a qualitative method of optimizing electrode structure and current spreading is proposed. With different currents and heat sink temperatures, the current non-uniformity and the luminance distribution of LED are analyzed. Temperature or current density crowding results in heat accumulation, increase of non-radiative recombination and the restriction of the emitting photons, hence thermal flux is an important factor influencing the luminance distribution. Through carrier transport mechanism, the reason for the temperature influence on luminance distribution is explained. Optimized contact electrode structure can improve current spreading and luminance uniformity, also considerably increase the reliability of high power LED.

Keywords: light emitting diode, current spreading, luminance uniformity, temperature distribution

PACS: 71.20.Mq, 73.40.Vz, 74.25.Fg, 74.25.Gz

* Project supported by the Key Science Project of Fujian Province, China (Grant Nos. 2011H0021, 2012H0039), the Science Project of Fujian Province, China (Grant No. 2011H6025), the Natural Science Foundation of Fujian Province, China (Grant No. 2011J05162), the Science Project of Education Bureau of Fujian Province, China (Grant No. JA11175), and the Foundation of Zhangzhou Normal University, China (Grant No. SJ1017).

† E-mail: yjlu@xmu.edu.cn

‡ E-mail: ylgao@xmu.edu.cn