

大功率 GaN 基发光二极管的电流扩展效应 及电极结构优化研究*

沈光地 张剑铭 邹德恕 徐 晨 顾晓玲

(北京工业大学北京市光电子技术实验室, 北京 100022)

(2007 年 5 月 18 日收到, 2007 年 6 月 5 日收到修改稿)

定性分析了 GaN 基 LED 的电流扩展效应, 发现电流密度和电流横向扩展的有效长度对电流均匀扩展有很大影响. 基于此, 对 GaN 基大功率 LED 提出了优化的电极结构, 以减缓电流拥挤效应, 降低器件串联电阻. 通过用红外热像仪测量器件表面的温度分布, 发现具有优化的环形插指电极结构的 GaN 基大功率 LED 表面温度分布比较均匀, 证明芯片接触处电流扩展均匀, 局部电流密度降低, 减小了焦耳热的产生, 增强了器件的可靠性.

关键词: 氮化镓, 发光二极管, 电流扩展, 电极结构优化

PACC: 7280E, 7360F, 7865K, 7360D

1. 引 言

GaN 基蓝光 LED 是一个电注入发光器件, 电流扩展分布对于整个器件的特性有着很重要的作用, 影响器件有源区发光的均匀性, 散热性能, 可靠性等特性. 目前, 商品化的 GaN 基蓝、绿光 LED 一般都是用 MOCVD 技术在绝缘的蓝宝石衬底上外延生长的^[1-4]. 由于蓝宝石不能导电, 必须利用台面结构, 因此欧姆接触的 p 型电极和 n 型电极只能在外延片表面的同一侧, 如图 1 所示是常规 GaN 基 LEDs 的结构. 在台面结构的 GaN 基 LED 里, 电流要侧向传输, 由于 n 型 GaN 层和下限制层的掺杂浓度不能太高, 横向电阻不能忽略, 使得靠近 n 型电极的台面边缘电流密度大于靠近 p 型电极焊盘的地方, 导致了电流拥挤效应^[5, 6]. 对大面积大功率的器件来说, 电流拥挤会更严重.

要使电流均匀扩展, 应当尽量使电流经过不同路径的阻值大小接近. 这主要有两种解决方法, 一是提高 n 型 GaN 层的电导率, 从而减小电流横向流动的电阻. Eliashovich 等^[5]报道了 n 型 GaN 层的电导率对电流均匀扩展有显著影响. 但是随着 n 型层掺杂浓度的提高, 晶体质量下降, 载流子散射严重, 电导率下降, 所以不能通过提高 n 型 GaN 掺杂浓度的

办法完全解决电流拥挤问题. 另外一个解决方法是优化电极几何形状^[7-9], 改变电流通道路径, 减小横向电阻. 当然消除横向电阻最根本的办法就是利用导电的 SiC 衬底^[10, 11], 激光剥离 (lift-off) 和键合技术^[12] 将蓝宝石衬底上的外延片键合到其他衬底如 Cu, Si 上, 使得 n 电极和 p 电极位于器件上下两侧,

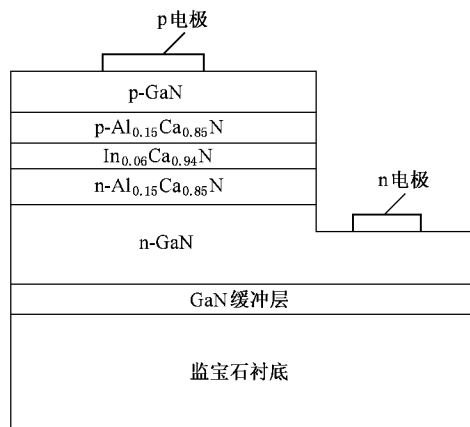


图 1 常规 GaN 基 LED 结构示意图

实现电流垂直流动的电极结构. 不过 SiC 衬底比较昂贵, 对光子有吸收, 激光剥离技术和芯片键合技术还有待于进一步发展. 本文主要根据一个简单模型定性地来阐述电流注入器件后在器件中的分布, 然

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2006CB604902) 北京市人才强教计划项目 (批准号: J05002015200504) 和国家高技术研究发展计划 (863) (批准号: 2006AA03A121) 资助的课题.

后优化电极结构,并用红外热像仪测量器件表面的温度分布来验证优化的电极结构能增强电流扩展效应。

2. 简单模型

图 2 为 GaN 基 LED 工作时电流经过两条通道的理论推算模型^[8], A, B 为从 p 电极到 n 电极的极端通路。为了分析更加方便,忽略金属半导体接触电阻。器件总的压降是横向压降和纵向压降之和,电流扩展路径可以是 A 和 B 两条路径中的任意一条,则器件中电流扩展层的压降 V_i 为

$$\begin{aligned} V_i &= (V_i)_{\text{vertical}} + (V_i)_{\text{lateral}} \\ &= (I \cdot R)_{\text{vertical}} + (I \cdot R)_{\text{lateral}} \\ &= (Jl\omega) \left(\frac{\rho_i t_i}{l\omega} \right) + (Jt_i\omega) \left(\frac{\rho_i l}{t_i\omega} \right) \\ &= J\rho_i t_i + J\rho_i l = J\rho_i (t_i + l), \quad (1) \end{aligned}$$

式中 V_i 为电流扩展层中的压降,是水平方向 $(V_i)_{\text{lateral}}$ 和垂直方向 $(V_i)_{\text{vertical}}$ 之和。 J 为电流密度,电流扩展层的电阻率为 ρ_i ,几何参数 l 表示电流扩展层中水平方向电流路径的长度, t_i 为电流扩展层的厚度, ω 是器件宽度。如果 p-GaN 层的压降为 V_p ,p-n 结的压降为 V_j 和 n-GaN 层压降为 V_n , ρ_i, ρ_p, ρ_n 分别为电流扩展层,p 型 GaN 层和 n 型 GaN 层的电阻率,则通过任一条通路的总电压降 V_T 为^[5,9]

$$\begin{aligned} V_T &= V_i + V_p + V_j + V_n \\ &= J\rho_i (l + t_i) + J\rho_p (l + t_p) \\ &\quad + V_j + J\rho_n (L + t_n), \quad (2) \end{aligned}$$

式中几何参数 L 表示 n 型 GaN 层中水平方向电流路径的长度。因为 t_i 和 t_n 较 l 和 L 来讲非常小可以忽略不计,所以我们忽略电流扩展层垂直方向的压降 $J\rho_i t_i$ 和 n 型层的压降 $J\rho_n t_n$ 。进一步,因为 $\rho_i \ll \rho_p$,有关 p 型 GaN 层横向电流通路的压降也忽略。电流以可能的任意一条路径流向扩展,所以通道 A, B 的压降可以写为

$$(V_T)_A = J\rho_i l + J\rho_p t_p + V_j + J\rho_n (L - l), \quad (3)$$

$$(V_T)_B = J\rho_p t_p + V_j + J\rho_n L. \quad (4)$$

将上面两式相减可得

$$\begin{aligned} (V_T)_A - (V_T)_B &= J\rho_i l + J\rho_p t_p + V_j \\ &\quad + J\rho_n (L - l) - J\rho_p t_p - V_j - J\rho_n L \\ &= \mathcal{K}(\rho_i - \rho_n)l. \quad (5) \end{aligned}$$

考虑(3)和(4)式之间的关系,很明当 A 路径

和 B 路径的压降相等时,经过 LED 器件有源区的电流扩展最均匀,所以 $\mathcal{K}(\rho_i - \rho_n)l \approx 0$ 。若要满足这个式子,则 ρ_i 和 ρ_n 必须相等,而这两个参数和材料本身的性质有关,我们可以做的是必须减小 J 和 l 。 J 与器件的工作条件有关,在大电流密度下电流拥挤效应更加明显,可以通过增大电流扩展层的面积减小 J ,可是在有限的器件尺寸上可以增大面积很少,并且电流扩展层对光线的吸收作用会更加明显。 l 与器件设计有关,可以通过优化电极几何形状达到减小有效长度的目的。所以本文采用了减小 l 的方法,来提高电流扩展效应。

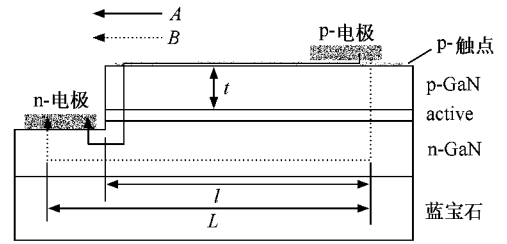


图 2 常规 GaN 基 LED 的电流扩展示意图^[8],电流通道 A 和 B 代表从 p 电极到 n 电极两种极端通路

另外,在倒装结构 GaN 基 LED 中,由于是背面出光,p 电极采用厚电极,外加电压在整个 p 区上均匀分布,在纵向上可以实现均匀的电流分布。当 LED 尺寸与电流密度加大之后,n-GaN 电阻不可忽略,造成了横向电流分布不均匀。以常规 GaN 基 LED 的块状电极为例,在 LED 内部某点的电流密度可以定义为^[6]

$$\mathcal{K}(x) = \mathcal{K}(0)\exp(-x/L_s), \quad (6)$$

其中 $\mathcal{K}(0)$ 为 p 台面边缘处的电流密度, L_s 为电流横向扩展的最大距离,即电流密度为 $\mathcal{K}(0)$ 的 $1/e$ 时 x 值,

$$L_s = \sqrt{(\rho_c + \rho_p t_p)t_n/\rho_n}. \quad (7)$$

因此块状电极的 LED,其电流密度随离开台面边缘的距离增加而呈指数衰减。而当大功率 GaN 基 LED 采用插指电极结构时,相当于多个 p-n 单胞并联,可以缩短电流横向扩展长度,通过电流互补实现相对均匀的电流分布。

如果把 n 型层、p 型层和 p 型欧姆接触都考虑进去,n 型欧姆接触的接触电阻比 p 型欧姆接触小很多,可忽略不计,下面简单计算块状电极和插指电极结构 LED 的串联电阻。

块状电极结构大面积下的串联电阻

$$R = R_c + R_p + R_n, \quad (8)$$

其中 R 为块状电极结构的串联电阻, R_c, R_p, R_n 分别为大面积下的 p 型接触电阻、p 型层的电阻和 n 型层电阻.

插指电极结构 (N (N 为并联单胞数) 个单元并联后电阻 R' ,

$$R'_c = \frac{\rho_c}{W \times L/N} = NR_c, \quad (9)$$

$$R'_p = \frac{\rho_p t_p}{W \times L/N} = NR_p, \quad (10)$$

$$R'_n = \frac{\rho_n L/N}{W \times t_n} = \frac{R_n}{N}, \quad (11)$$

$$R' = \frac{1}{N}(R'_c + R'_p + R'_n) = R_c + R_p + N^{-2}R_n. \quad (12)$$

因此, 插指电极结构可以有效地降低串联电阻 R' , $R' \sim N^{-2}$.

单胞数增加在降低串联电阻的同时, 还可以有效增大侧面出光面积, 有利于提高器件的效率, 然而势必以牺牲有源区面积为代价, 二者均衡考虑是优化设计的出发点.

3. 电极结构优化

按照上述定性分析, 我们设计了两组不同的电极结构, 如图 3 所示.

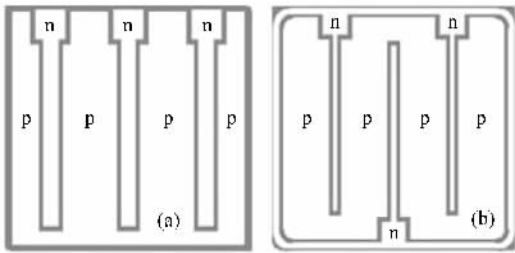


图 3 大功率 GaN 基 LED 的两种不同电极结构 (a) 插指电极; (b) 环形插指电极

图 3 所示是大功率 GaN 基 LED 倒装管芯的两种不同电极结构 (a) 和 (b). (a) 是典型的插指结构, n 电极插在 p 电极中, n 电极的每个指是孤立的. 而 (b) 是改变的环形插指结构, n 电极也是插在 p 电极中, 但 n 电极的每个指通过一个环状电极连接在一起. 我们可以看到 (a) 中 n 电极在芯片的一侧, 电流扩展都要从 p 区域到达 n 区域, 或经插指流向 n 电极, 电流都要聚集在 p, n 交界的区域; 而 (b) 中 n 电极分布在芯片两侧, 并用环形电极连接起来, 电流一

部分可以通过 p 区域到达两端 n 电极, 一部分则可以从 p 区经环形路径扩展到 n 电极. 如设图 3 中的 (b) 电极结构中从 p 至 n 的扩展路径 l 的平均值为 l_B , (a) 电极结构中的扩展路径 l 的平均值为 l_A , 那么 $l_B < l_A$, 也就是 (b) 电极结构更能使电流扩展均匀.

图 3 (a) 所示电极结构制作的 GaN 基大功率 LED 外接电流后, 电流由 p 区都流向 n 电极或经插指流向 n 电极, 从而 p, n 电极交界区域尤其 n 电极端在器件工作的过程中集聚了大量电流, 导致这部分区域电流密度很大, 产生很多焦耳热, 而在其他区域由于电流分散地流向 n 电极的插指区, 使得这个区域的电流密度小很多, 产生的焦耳热也小很多. 在器件工作过程中, p, n 交界区温度过高, 使这部分区域的有源区非辐射复合增加, 内量子效率下降且过高的工作温度很容易损坏器件. 而在其他区域流过有源区的电流密度将相对要小, 离 n 电极区域越远电流密度越小, 使这些区域有源区的辐射复合的能力减弱, 而导致总辐射功率和发光效率的降低. 在图 3 (a) 结构的基础上将 n 电极制作成环形插指并且 n 电极分布在芯片两端, 如图 3 (b), 这种情况下器件接通电流后, 外接电流从 p 电极流向环形 n 电极, 或流向插指电极, 或直接流向 n 电极焊盘, 这样电流自均衡地分散着流向 n 电极, 器件的电流分布更加均匀, 避免了因电流集中在局部而产生很多焦耳热, 温度过高而损坏器件.

4. 结果分析

为了验证以上的分析, 我们对优化的 GaN 基大功率 LED 的两种不同电极结构, 分别制作倒装大功率管芯, 并倒装焊接在 Si 支架上, 然后把裸芯片烧结在金属管座上, 利用红外热像仪测量器件表面的温度分布, 来验证不同电极结构的电流扩展均匀性, 以证明我们优化电极结构的合理性.

红外热像仪是非接触测温仪器, 利用振动(或旋转)反射镜等光学系统对试样进行高速扫描, 并将发自试样表面各点的热辐射(远红外区)会聚至检测器, 变成电信号, 再由显示器形成彩色图像, 分析观察试样表面温度分布. 由于在测试温度之前, 需要测量和计算试样的发射率, 要求样品与仪器的恒温台紧密接触, 试样采用封装形式为金属管座裸装, 不是常见的环氧树脂封装, 而且在温度测量过程中, 样品一直与很大的热沉接触, 比正常工作时的散热条件

好,所以表面温度测量值应该比正常工作时低,但是

能反应正常工作时的温度分布情况。

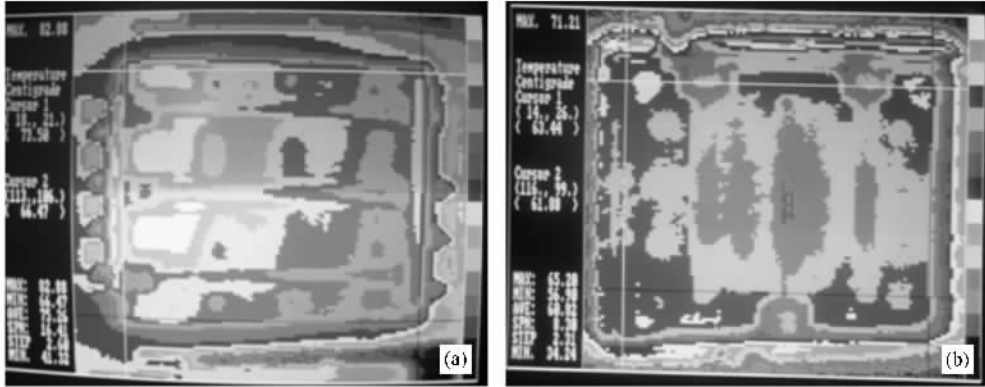


图4 两种不同电极结构的倒装大功率 GaN 基 LED 的表面温度分布 (a)插指电极 (b)环形插指电极

图4所示是不同电极结构倒装大功率LED在350mA工作电流下的表面温度分布。可以看出,插指电极结构的温度比环形插指电极结构的温度高,高温区主要集中在n型电极焊盘附近的p区,温度分布不均匀,最高温度为82.88℃,最低温度为66.47℃。这说明插指电极结构的电流扩展并不均匀,而环形插指电极结构的大面积区域温度分布明显比较均匀,最高温度为71.21℃,跟前者相比温差近10℃,有明显优势。这是由于环形插指n电极面积加大,减小了电流扩展路径,使电流在n型区流动时的横向电阻减小,产热量减小,所以器件温升小,有更高的可靠性。

5. 结 论

综上,我们定性分析了GaN基LED的电流扩展效应,发现电流密度和电流横向扩展的有效长度对电流均匀扩展有很大的影响。基于此,我们对GaN基大功率LED提出了优化的电极结构,以减缓电流拥挤效应,降低器件串联电阻。通过用红外热像仪测量器件表面的温度分布,发现优化的环形插指电极结构使芯片表面温度分布比较均匀,说明芯片内电流扩展均匀,局部电流密度降低,减小了焦耳热的产生,增强了器件的可靠性。

- [1] Wierer J J, Steigerwald D A, Krames M R, O'Shea J J, Ludowise M J, Christenson G, Shen Y C, Lowery C, Martin P S, Subramanya S, Gotz W, Gardner N F, Kern R S, Stockman S A 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 3379
- [2] Xu B, Yu Q X, Wu Q H 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 204 (in Chinese)[徐波、余庆选、吴气虹等 2004 物理学报 **53** 204]
- [3] Li Z H, Yu T J, Yang Z J, Feng Y C, Zhang G Y, Guo B P, Niu H B 2005 *Chin. Phys.* **14** 1009
- [4] Liu N X, Wang H B, Liu J P, Niu N H, Han J, Shen G D 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1424 (in Chinese)[刘乃鑫、王怀兵、刘建平、牛南辉、韩军、沈光地 2006 物理学报 **55** 1424]
- [5] Eliashevich I, Li Y, Osinsky A 1999 *Proc. SPIE.* **3621** 28
- [6] Guo X, Schubert E Y 2001 *J. Appl. Phys.* **90** 4191
- [7] Guo X, Schubert E Y, Jahns J 2001 *Pro. of SPIE* **4278** 133
- [8] Kim H, Seong J P, Hwang H, Park N M 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 1326
- [9] Kim H, Lee J M, Chul H, Kim S W, Kim D J, Park S J, Hwang H 2000 *Appl. Phys. Lett.* **77** 1903
- [10] Edmond J A, Kong H S, Leonard M 1997 *Pro. of SPIE* **3002** 1
- [11] Shan W, Fischer A J, Song J J, Bulman G E, Kong H S, Leonard M T, Perry W G, Brenner M D, Davis R F 1996 *Appl. Phys. Lett.* **69** 740
- [12] Wong W S, Sands T, Cheung N W 1999 *Appl. Phys. Lett.* **75** 1360

Research on effects of current spreading and optimized contact scheme for high-power GaN-based light-emitting diodes^{*}

Shen Guang-Di Zhang Jian-Ming Zou De-Shu Xu Chen Gu Xiao-Ling
(*Beijing Optoelectronic Technology Laboratory, Beijing University of Technology 100022, China*)
(Received 18 May 2007; revised manuscript received 5 June 2007)

Abstract

GaN-based light-emitting diodes (LEDs) grown on sapphire substrate have current transport along the lateral direction due to the insulating nature of the substrate, and the anode and cathode contacts are in a side-by-side configuration. The resistance of the n-type material of the GaN and the lower confinement layer is not negligible, which causes the current to crowd near the edge of the n-contact pad. The current crowding problems will become more severe for large area and high power devices. In this paper, the current spreading effect is qualitatively analyzed. The applied current density and the effective length of the lateral current transport are found to have a considerable effect on the uniform current spreading. Based on these findings, an optimized contact scheme of high-power GaN-based LEDs is proposed to alleviate current crowding effect and reduce the series resistance of the devices. It is clearly shown that the high-power GaN-based flip-chip LEDs with optimized ring-shape interdigitated contact scheme have a relatively uniform temperature distribution by measuring the surface temperature distribution of the device with infrared thermal imaging system. It is confirmed that the current distributes more uniformly over the contact, and current densities in a localized region of the device are reduced, which can decrease the joule heat generated and improve the reliability of the GaN-based LED.

Keywords : GaN, light emitting diode, current spreading, optimized contact scheme

PACC : 7280E, 7360F, 7865K, 7360D

^{*} Project supported by National Basic Research Program of China (Grant No. 2006CB604902), the Talent Promoting Education Beijing, China (Grant No. 05002015200504) and the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2006AA03A121).