

电极结构优化对大功率 GaN 基发光二极管性能的影响*

张剑铭 邹德恕 徐 晨 顾晓玲 沈光地

(北京工业大学北京市光电子技术实验室,北京 100022)

(2007 年 1 月 24 日收到,2007 年 3 月 27 日收到修改稿)

在台面结构的 GaN 基发光二极管(LED)里,电流要侧向传输,当尺寸与电流密度加大之后,由于 n 型 GaN 层和下限制层的横向电阻不能忽略,造成了横向电流分布不均匀.通过优化电极结构,以减小电流横向传输距离,制作出两种不同电极结构的大功率 GaN 基倒装 LED.通过比较这两种不同电极结构的 GaN 基倒装大功率 LED 的电、光性能,发现在 350 mA 正向电流下,插指电极结构的倒装大功率 GaN 基 LED 的正向电压为 3.35 V,比环形插指电极结构的倒装大功率 GaN 基 LED 高 0.15 V.尽管环形插指电极结构 GaN 基 LED 的发光面积略小于插指电极结构 GaN 基 LED,但在大电流下,环形插指电极结构倒装 GaN 基 LED 的光输出功率比插指电极结构的倒装大功率 LED 的光输出功率大,并且在大电流下,环形插指电极结构的倒装大功率 LED 光输出功率饱和速度慢,而插指电极结构的倒装大功率 LED 光输出功率饱和明显.这说明优化电极结构能提高电流扩展均匀性,减小焦耳热的产生,改善 GaN 基 LED 的性能.

关键词: GaN, 发光二极管, 电极结构, 大功率

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

1. 引 言

20 世纪 90 年代以来, GaN 基蓝光发光二极管(LED)的高亮度化实现了红、绿、蓝三基色完备的发光体系^[1],用 LED 照明的设想就成为现实.高亮度的蓝光 LED 与特殊的荧光粉物质组合产生橙黄色光,再与蓝光混合就可以得到白光^[2].在节能照明光源的应用日趋成熟,深有潜力.由于 LED 的种种优势,它除了应用在交通指示灯、汽车尾灯、背光源、固态照明等外,把红、绿、蓝发光二极管按比例组合起来获得清晰的全彩色显示用于大面积显示屏更是有广阔的应用前景.目前,商品化的 GaN 基蓝、绿光 LED 一般都是用金属有机化学气相沉积(MOCVD)技术在绝缘的蓝宝石衬底上外延生长的^[3-6].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.图 1 所示是常规 GaN 基 LED 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^[7,8].对大面积大功率的器件来说,电流拥挤会更严重.优化电极几何形状^[9-11],改变电流通道路径,减小横向电阻,可以使电流扩展均匀.

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^[8]

$$J(x) = J(0) \exp(-x/L_s), \quad (1)$$

其中 $J(0)$ 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 $J(0)$ 的 $1/e$ 时的 x 值,具体表达式为

$$L_s = \sqrt{(\rho_c + \rho_p t_p) t_n / \rho_n}, \quad (2)$$

* 国家重点基础研究发展计划(973)项目(批准号:2006CB604902),北京市人才强教计划项目(批准号:05002015200504)和国家高技术研究发展计划(863)批准号:2006AA03A121 资助的课题.

其中 ρ_c 为 p 型接触电阻, ρ_p, ρ_n 分别为 p 型 GaN 层和 n 型 GaN 层的电阻率, t_n 为 n 型 GaN 层的厚度, t_p 为 p 型 GaN 层的厚度.

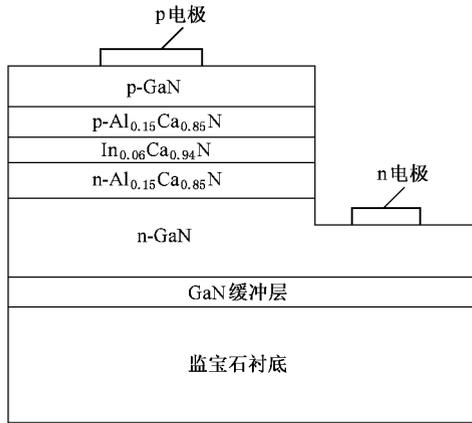


图 1 常规 GaN 基 LED 结构示意图

由 (1) 式可知, 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, 降低串联电阻, 通过电流互补实现相对均匀的电流分布. 单胞数在增加的同时, 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.

对于大功率 GaN 基倒装 LED, 本文提出了两种不同的电极图形, 一种称之为插指电极, 即 n 电极插在 p 电极中, n 电极的每个指是孤立的, 如图 2(a) 所示; 另一种称之为优化的环形插指电极, 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, 如图 2(b) 所示. 用两种电极图形制作的大功率 GaN 基倒装 LED 芯片具有相同的面积. 可以看到, 图 2(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, 而图 2(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. 如如图 2(b) 中的电极结构中从 p 至 n 的扩展路径 l 的平均值为 l_B , 图 2(a) 电极结构中的扩展路径 l 的平均值为 l_A , 那么 $l_B < l_A$, 也就是说图 2(b) 电极结构更有利于使电流扩展均匀.

2. 大功率 GaN 基倒装 LED 的制作

为了验证以上分析, 本文用图 2 所示的两种电极图形来制作大功率 GaN 基倒装 LED, 然后对其电、光性能进行比较.

本文使用 Veeco D180 MOCVD 系统, 以蓝宝石为衬底, 三甲基镓 (TMGa) 和高纯氨 (NH_3) 分别作为 Ga 和 N 源, 二茂镁 (Cp_2Mg) 与硅烷 (SiH_4) 分别作为 p 型与 n 型掺杂剂. 先在蓝宝石衬底上淀积一层 n-GaN 缓冲层, 然后生长 n-GaN, 再生长 n-GaN 下限制层, 之后生长 5 周期的 InGaN/GaN 多量子阱, 最后生长 200 nm 的 p-GaN 盖层, 掺杂浓度为 5×10^{19} . 随后在相同外延片上采用两套不同电极图形的版图制作大功率 GaN 基倒装 LED 芯片. 其制作过程大致如下: 1) 在外延片顶部的 p-GaN 淀积厚度为 10/50 nm 的 NiAu/Al 层, 用于欧姆接触和背反射. 2) 采用掩模选择刻蚀掉 p 型层和多量子阱有源层, 露出 n 型层. 3) 淀积、刻蚀形成 n 型欧姆接触层, 芯片尺寸为 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$. 4) 然后磨片、划片、裂片, 最后把每个分离的金属化凸点的 GaN 芯片倒装焊接在具有防静电保护二极管 (ESD) 的硅支架 (submount) 上, 再把此倒装的 LED 芯片装配到 TO-3 基座上. 5) 通过倒装 GaN 芯片的硅支架与管壳底盘进行电气连接. 制作完成的 LED 芯片用半导体参数测试系统测量器件的 $I-V$ 特性, 用校准的 Si 光电探测器积分球来测试光输出功率, 这里用来进行电、光测试的芯片都是压焊好没有用环氧树脂封装的裸芯片.

3. 结果与讨论

用半导体参数测试仪测试两种倒装 LED 的正向电流-正向电压 ($I-V$) 特性, 测试结果如图 3 所示. 由图 3 可以看出, 350 mA 正向电流下, 插指电极结构倒装大功率 GaN 基 LED 的正向电压为 3.35 V, 而

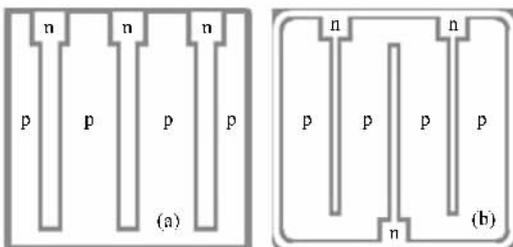


图 2 大功率 GaN 基 LED 的两种不同电极结构 (a) 插指电极; (b) 环形插指电极

环形插指电极结构的倒装大功率 GaN 基 LED 为 3.2 V 相差 0.15 V. 由于采用同一片外延片, 欧姆接触制作工艺条件也完全相同, 而且都是采用倒装结构, 所以电极结构不同导致电流分布不均匀, 引起电流拥挤是导致电压升高的主要原因.

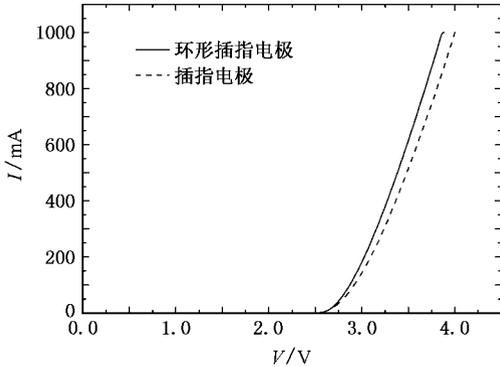


图3 不同电极结构倒装大功率 GaN 基 LED 的 I - V 特性

我们测量 GaN 基倒装大功率 LED 在不同电流下的光输出功率, 发现随着正向注入电流增加, 光输出功率呈亚线性增加, 但是当电流大于某个值时, 光输出会出现饱和, 在饱和区域, 光输出不再随着注入电流增加而增加, 反而会下降, 说明注入的部分电子是以非辐射的形式释放自身能量的. 在 LED 器件中, 产生光输出饱和的可能原因有载流子溢出和自身发热等. Guo 等人^[12]用不同占空比的脉冲电流研究 GaN/InGaN LED 光输出饱和和特性, 发现当注入占空比小的脉冲电流时, 光饱和现象不明显, 表明热的产生是光功率饱和的主要原因.

本文测试的不同电极结构的倒装大功率 GaN 基 LED 光输出功率 P 与正向电流 I 的关系如图 4 所示. 从图 4 可以看出, 在小电流时, 环形插指电极倒装大功率 GaN 基 LED 的光输出功率略小于插指电极倒装大功率 LED 的光输出功率, 这是由于环形插指电极结构的 GaN 基 LED 发光面积略小于插指电极的, 当然在小电流下, 电流扩展不平衡对器件的性能影响还不明显, 所以光输出功率差别不大. 随着电流的增加, 不同电极结构的倒装大功率 GaN 基 LED 的光输出功率都增大, 但环形插指电极结构的倒装 GaN 基 LED 增加的速度快, 说明环形插指电极的电流扩展均匀, 增加了器件的有效发光区. 当电流增加到 800 mA 电流时, 插指电极结构的倒装大功率 LED 光输出趋于饱和, 而环形插指电极结构的倒装大功率 LED 光输出还有增加的趋势, 在 1000 mA 光输出还未出现饱和^[13], 并且随着电流的增加, 两者

的差距增大.

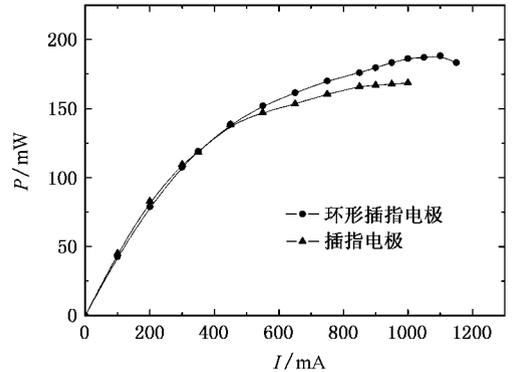


图4 不同电极结构倒装大功率 GaN 基 LED 光输出功率与正向电流的关系

我们认为插指电极结构制作的 GaN 基倒装大功率 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, 量子效率下降且过高的工作温度很容易使光输出饱和. 而在其他区域流过有源区的电流密度将相对的要小, 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. 而环形插指电极结构的倒装大功率 GaN 基 LED 的 n 电极分布在芯片两端, 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, 造成光输出饱和. 而且环状插指电极有利于散热, 所以其光输出饱和现象不明显.

4. 结 论

本文通过优化电极几何形状, 提出了两种不同的电极结构, 并制作出两种不同电极结构的大功率 GaN 基倒装 LED. 通过比较这两种不同电极结构的 GaN 基倒装大功率 LED 的电、光性能, 发现在 350 mA 正向电流下, 插指电极结构的倒装大功率 GaN 基 LED 的正向电压为 3.35 V, 比环形插指电极

结构的倒装大功率 GaN 基 LED 高 0.15 V. 尽管环形插指电极结构 GaN 基 LED 的发光面积略小于插指电极结构 GaN 基 LED 的,但在大电流下,环形插指电极结构的倒装 GaN 基 LED 光输出功率比插指电极结构的倒装大功率 LED 的光输出功率大. 并且环

形插指电极结构的倒装大功率 LED 光输出饱和速度慢,在 1000 mA 正向电流下还未出现饱和. 这说明优化电极结构能提高电流扩展均匀性,改善了 GaN 基 LED 的性能.

-
- [1] Nakamura S ,Mukai T ,Senoh M 1994 *Appl. Phys. Lett.* **64** 1687
- [2] Damilano B ,Grandjean N ,Pernet C ,Massies J 2001 *Jpn. J. Appl. Phys.* Part **2** L918
- [3] 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 ,Götz W ,Gardner N F ,Kern R S ,Stockman S A 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 3379
- [4] Xu B ,Yu Q X ,Wu Q H ,Liao Y ,Wang G Z ,Fang R C 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 204 (in Chinese) [徐 波、余庆选、吴气虹、廖源、王冠中、方容川 2004 *物理学报* **53** 204]
- [5] 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
- [6] 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]
- [7] Eliashevich I ,Li Y ,Osinsky A 1999 *Proc. SPIE.* **3621** 28
- [8] Guo X ,Schubert E Y 2001 *J. Appl. Phys.* **90** 4191
- [9] Guo X ,Schubert E Y ,Jahns J 2001 *Pro. SPIE.* **4278** 133
- [10] Kim H ,Park S ,Hwang H ,Park N M 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 1326
- [11] Kim H ,Lee J M ,Chul H ,Kim S W ,Kim D J ,Park S J ,Hwang H 2000 *Appl. Phys. Lett.* **77** 1903
- [12] Guo X ,Schubert E Y 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 3337
- [13] Zhang J M ,Zou D S ,Xu C ,Zhu Y X ,Liang T ,Da X L ,Shen G D 2007 *Chin. Phys.* **16** 1135

Effects of optimized contact scheme on the performance of high-power GaN-based light-emitting diodes^{*}

Zhang Jian-Ming Zou De-Shu Xu Chen Gu Xiao-Ling Shen Guang-Di

(*Beijing Optoelectronic Technology Laboratory , Beijing University of Technology , Beijing 100022 , China*)

(Received 24 January 2007 ; revised manuscript received 27 March 2007)

Abstract

Due to the lateral current transport in the mesa-structure GaN based LEDs ,the resistance of the n-type material of the GaN and lower confinement layer is not negligible for large area and high applied current density applications ,which causes the current spreading nonuniformly along the lateral direction. With an optimized contact scheme to reduce the length for the lateral current transport ,two different kinds of contact schemes of high-power GaN-based flip-chip LEDs (FCLEDs) are fabricated. It is shown that the forward voltage of this FCLED with interdigitated contact scheme is 3.35 V at forward current 350 mA ,and exceeds that of FCLEDs with optimized ring-shaped interdigitated contact scheme by 0.15 V. Although the light emitting area of FCLEDs with optimized ring-shaped interdigitated contact scheme is slightly smaller than that of FCLEDs with interdigitated contact scheme ,it is found that the light output from the former is larger than that from the later at higher injection currents. Furthermore ,the light output from the FCLEDs with optimized ring-shaped interdigitated contact scheme saturates slowly at higher injection currents as compared to the FCLEDs with interdigitated contact scheme ,indicating that the saturation behavior of the FCLEDs with interdigitated contact scheme is more pronounced. It is confirmed that an optimized contact scheme ,which leads to the more uniform current spreading ,can decrease joule heat generated and considerably improve the electrical and optical characteristics of the FCLEDs.

Keywords : GaN , light emitting diode , contact scheme , high-power

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

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