

优化 GaN 基发光二极管的电极

毛明华, 尹以安, 刘宝林, 张保平

(厦门大学 物理系, 福建 厦门 361005)

摘要: 针对以蓝宝石为衬底的 GaN 基发光二极管出现的电流扩展不均的问题, 采用有限元方法建立了 GaN 基发光二极管的三维网络模型, 并对四种常见结构的器件进行数值模拟, 发现影响二极管电流的因素不仅与发光二极管电极的位置有关, 而且依赖于器件的结构参数。以电流扩展不均指标确定出这四种器件中最佳的电极位置分布, 同时对最佳电极位置分布的器件进行了结构参数优化, 结果表明当 p 型金属层方块电阻与 n 型 GaN 的方块电阻接近时, 电流扩展均匀性最好, 且 p-GaN 的接触电阻和厚度越小, 电流扩展越不均匀。

关键词: 有限元方法; 三维网络模型; 电极; 电流扩展

中图分类号: TN312.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-353X (2007) 10-0000-04

Optimization Electrode of GaN-Based Light-Emitting Diode

MAO Ming-hua, YIN Yi-an, LIU Bao-lin, ZHANG Bao-ping

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

Abstract: A 3D networks model of GaN-based LED on sapphire substrate was built by finite element analysis to simulate the non-uniformity current spreading. Analog modeling was done on the four normal device structures, it was found that the factors effected the current of LED were the position of electrode and the parameters of device structure. Considering the practical structures of GaN-based LED, four LED designs were modeled and the optimal electrode distribution was obtained, meanwhile the structure parameters were optimized. It reveals that the smaller contact resistances and the thickness of p-GaN are, the more non-uniformity of current distribution is.

Key words: finite element analysis; 3D net model; electrode; current spreading

1 引言

由 AlN, GaN, InN 组成的 III-V 族氮化物及其合金的直接带隙可以从 InN 的 0.7 eV 到 AlN 的 6.2 eV 变化, 因此由 III-V 族氮化物制备的各种器件的工作波长可以从红光一直延续到紫外波段, 且 III-V 族氮化物还具有优良的光电学和优异的材料机械性质, 耐高温不易受腐蚀等特性。但由于 GaN 基 LED 外延生长时常用不导电蓝宝石作衬底, 导致器件的两个电极常做在外延片表面的同一侧, 影

响器件的发光性能, 并且对器件寿命也具有很大的影响^[1]。目前国外有人采用一维模型和商业软件来研究二极管电流扩展与器件结构的关系^[2-6], 但一维模型难以给出实际器件的电极分布位置与电流的关系, 且商业软件的成本又较高。为了避免此类问题, 本文采用有限元方法建立了一个三维模型, 模拟了常用的几种二极管结构, 得出影响二极管电流的一系列因素, 重点探讨了电极分布与器件结构因素, 得出更加全面的电极与二极管电流之间的关系, 获得了最优的电极分布位置, 并且在此基础上对器件的结构参数进行了优化, 得出接触电阻和 p-GaN 厚度越小, 电流扩展越不均的结论。

基金项目: 国家自然科学基金 (60276029); 国家 863 计划 (2004AA311020 和 2006AA032409); 福建省科技项目和基金 (2006H0092, A0210006, 2005HZ1018)

2 GaN 基 LED 结构网络模型及计算方法

本文采用如图 1 所示的 GaN 基发光二极管 (LED) 器件结构, 在蓝宝石衬底上生长 3 nm 缓冲层, 接着长 2 μm 厚的 n-GaN, 典型掺杂浓度 $7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 然后长 5 个周期 InGaN/GaN 量子阱, 再生长 0.3 μm 厚的 p-GaN, 其掺杂浓度为 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 。p 电极采用金属 Ni/Au (5 nm/5 nm), n 电极采用金属 Ti/Al/Ni/Au。由于流过 GaN 基二极管的电流不仅与二极管结构参数有关, 还与金属层的材料、尺寸、接触电阻、p-GaN 与 n-GaN 的掺杂浓度、厚度、横截面大小、电极的位置等有关。本文选择了常见结构的四种版图进行模拟, 如图 2 所示。图 2 (a) 为 p 电极位于台面左侧中点, n 电极位于台面右侧; 图 2 (b) 为 p 电极位于台面中间, 而 n 电极分布在整個台面周围; 图 2 (c) 为 p 电极与 n 电极位于台面对角; 图 2 (d) 为 p 电极与 n 电极位于台面左右两侧。器件的尺寸都为 $345 \mu\text{m} \times 345 \mu\text{m}$, 电极的焊盘为 $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ 。

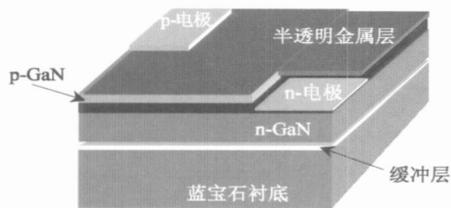


图 1 GaN 基 LED 结构图

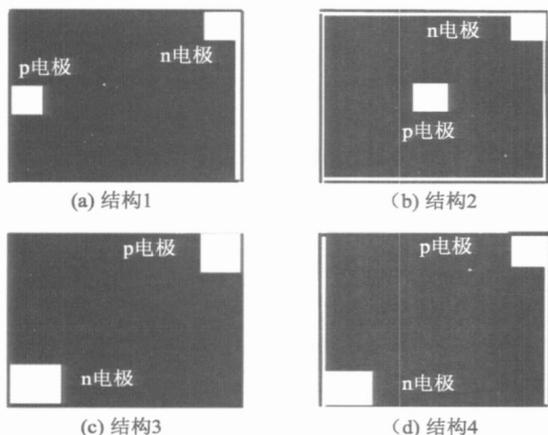


图 2 LED 结构版图

对于有限体积大小的二极管, 将它划分为若干个大小相同的长方形六面体单元, 每个长方体的大小可根据实际器件的大小进行调整。根据所选二极

管的结构把其分为四层: 金属层、p-GaN、有源区和 n-GaN, 对有源区划分为若干个理想的二极管, 其他三层每一层都划分为若干个长方形六面体的单元, 对其中每一个六面体单元, 通过等效电路数值提取方法^[7], 建立一个三维单元网络模型如图 3 (a) 所示, 六面体中心为节点。根据器件的实际结构特征, 即 p-GaN 的横向电阻远大于纵向电阻, 金属层的纵向电阻远小于接触电阻, 建立模型时, 不考虑 p-GaN 的横向电阻与金属层的纵向电阻, 并将两节点间的电阻等效成一个单元电阻, 根据这些假设整个二极管可等效为电阻与理想二极管连接的网络, 称之为三维网络模型, 见图 3 (b)。其中 R_1 为金属层的横向电阻, R_2 为 p-GaN 的纵向电阻与金属层的接触电阻之和, R_3 为 n-GaN 的横向电阻。

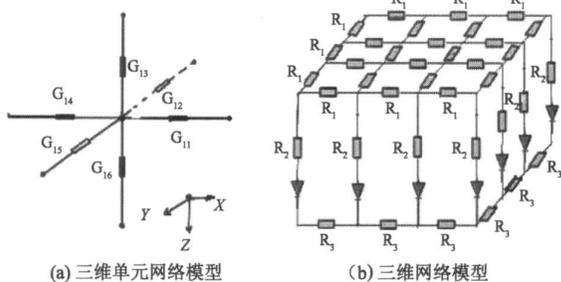


图 3 网络模型

对于任意一个节点, 满足基尔霍夫电流定律

$$\sum_{i=1}^6 I_i = 0 \quad (1)$$

对于不含理想二极管的支路应用节点电势差与电导的关系表示为

$$\sum \Phi_j G_{ij} = 0 \quad (2)$$

式中: Φ 为电势; G 为电导; i 为节点; j 为每个节点对应的相邻的节点数, 取 1, 2, 3, 4, 5, 6。含有理想二极管的支路应用基尔霍夫电流定律表示为

$$\sum \Phi_j G_j + I_0 (\exp (qv/kT) - 1) = 0 \quad (3)$$

式中: I_0 为二极管工作反向饱和电流; V 为加在二极管上的电压; q 为电子的电量; k 为玻尔兹曼常数, T 为温度。对于每层划分网格个数为 m^2 (m 代表长方形六面体单元个数), 因此整个二极管可建立 $3m^2$ 个节点方程, 考虑到方程的实际物理意义与计算机的限制, 本文每层网格个数取为 44 个。建立的非线性方程组采用蒙特卡洛方法求解, 各层材料参数由表 1 给出。

表 1 各层的材料参数

电流/mA	20
p 型金属层方块电阻/ Ω	10
p-GaN 的接触电阻率/ $\Omega \cdot \text{cm}^2$	6×10^{-3}
p-GaN 的厚度/ μm	0.3
p-GaN 的电阻率/ $\Omega \cdot \text{cm}$	1
n-GaN 的厚度/ μm	2
n-GaN 的电阻率/ $\Omega \cdot \text{cm}$	4×10^{-3}
n-GaN 的方块电阻/ Ω	20
器件长与宽/ μm	345

3 结果与讨论

衡量一个外加电流恒定的 LED 的特性好坏，可以用电流的均匀性来描述，均匀性越好表明器件的发光均匀性与温场分布均匀性越好。电流的均匀性可用电流扩展不均相对值来表示，它定义为：(流过理想二极管电流最大值-流过理想二极管电流最小值)/流过理想二极管电流最大值^[6]。图 4 给出了图 2 中四种设计结构器件的电流扩展不均相对值。从图 4 中数据可以看到，图 2 (b) 结构图的电流扩展不均相对值最小，这主要是因为图 2 (b) 所表示结构对称性最好，载流子可以以总的最小路径从一个电极到达另一个电极，因此可以认为图 2 (b) 所示结构对应电极分布最为合理。

图 4 中显示的四中结构图都存在电流扩展不均，图 5 给出了图 2 (b) 结构的电流分布等高图，其中 X 与 Y 轴表示位置坐标，电流的单位为 mA，模拟参数由表 1 给出。图中的数据从 0.6~ 0.64 mA 变化，说明流过有源区的电流扩展不均，这一现象出现的根本原因是由于生长 GaN 基 LED 的外延片采用蓝宝石作衬底，因而 p 型电极与 n 型电极位于同一侧，导致 n 型区和 p 型区电阻分布的不对称。要解决这个问题，可以采用激光剥离方法将不导电的蓝宝石衬底换成导电衬底，但这种方法会受到工艺条件的限制。基于目前常用的 GaN 基 LED 结构还是采用蓝宝石作衬底，因此本文通过优化器件结构来改善电流扩展的不均匀性。

材料的结构参数也会影响器件的发光特性，本文对图 2 (b) 所表示结构图进行了结构参数的优化。图 6 是 p 型金属层方块电阻改变对电流扩展均匀性的影响，从图中可以看到电流扩展不均匀相对值并不是单调变化，在 19 Ω/\square 存在最小值。导致电流扩展不均主要原因在于 n 型区和 p 型区方块电

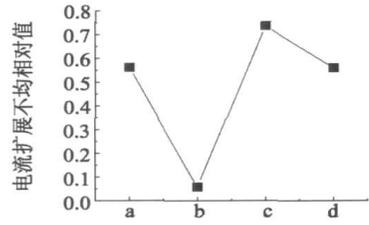


图 4 四种设计结构图对应的电流扩展不均相对值

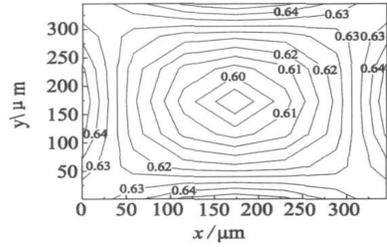


图 5 对应图 2 (b) 结构图的电流分布等高图

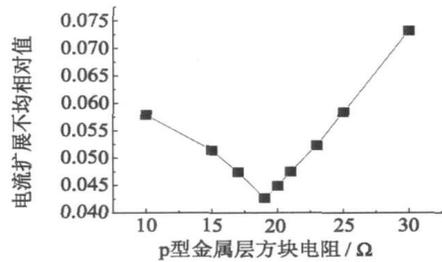


图 6 电流扩展不均匀性与 p 型金属层方块电阻的关系

阻分布的不对称，如果在器件参数上选取 n 型区和 p 型区方块电阻分布对称，那么就可以获得最佳的电流扩展均匀性。X. Guo 等人^[8,9]在这一方面也作了理论上的探讨。本文中 n-GaN 的方块电阻参数可知为 20 Ω/\square ，要获得最佳的电流扩展均匀性 p 型金属层方块电阻也应该为 20 Ω/\square ，而本文得出的结果为 19 Ω/\square ，出现这一现象的主要原因是本文的模型在简化过程中没有考虑 p-GaN 横向电阻。

图 7 是 p-GaN 的厚度与电流扩展不均匀性、p-GaN 这层电阻三者之间的关系。从图中可见当 p-GaN 厚度从 0.1~ 0.6 μm 变化，而其他参数保持不变的情况下，电流扩展不均相对值随着厚度的增大而变小，而电阻却随着厚度的增大而增大。出现这一现象的主要原因可从器件的模型上看出，随着 R_2 的增大， R_1 与 R_3 的不对称分布对流过理想二极管的电流影响会减弱，从而改善了电流扩展的不均匀性，但却导致了二极管电阻的增加，增大了二

极管的功耗, 因此在实际器件中对 p-GaN 这层厚度的选取应根据实际需要选取。

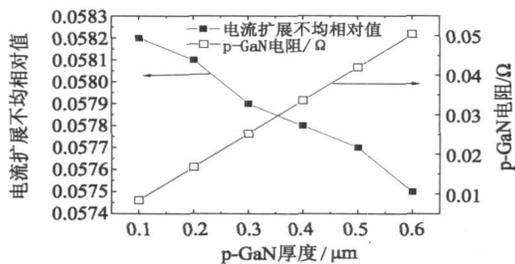


图7 电流扩展不均匀性、p-GaN电阻与厚度变化的关系

图8是n-GaN的厚度与电流扩展不均匀性、n-GaN这层方块电阻三者之间的关系。当n-GaN的厚度从1~6μm变化, 而其他参数保持不变的情况下, 电流扩展不均相对值在5μm处出现了最小值, 而n-GaN的方块电阻却随着厚度的增加而变小, 这一现象出现的主要原因与p型金属层方块电阻对电流扩展不均匀性的影响相同。

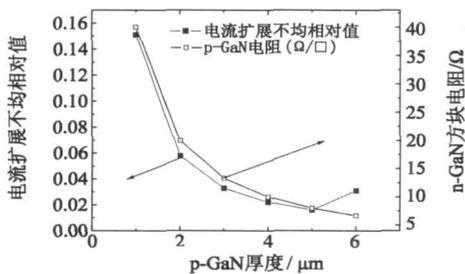


图8 电流扩展不均匀性、方块电阻与厚度变化曲线

图9研究了通过改变p-GaN的接触电阻率来优化电流扩展不均匀性。当p-GaN的接触电阻率从 1×10^{-3} 到 $8 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 变化时, 而其他参数保持不变的情况下, 电流扩展不均相对值从0.589降到0.0402, 这与期望通过降低p型GaN的接触电阻率来优化电流扩展不均匀性的想法相矛盾。出现这一现象的主要原因同样可从器件的模型结构上来看, 随着 R_2 的变小, R_1 与 R_3 的不对称分布对流过理想二极管的电流影响会加强, 导致电流扩展不均更加严重。

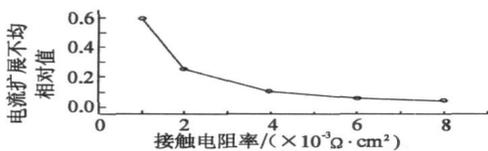


图9 电流扩展不均匀性与p-GaN接触电阻率变化曲线

4 结论

通过等效电路数值提取方法, 建立了GaN基二极管的三维网络模型, 模拟了二极管工作时电流与电极位置的关系, 得到在实际应用中电流分布不均最小的二极管, 且从二极管的电流扩展均匀性这个方面来考虑对器件参数进行改变, 得到当p型金属层的方块电阻与n-GaN方块电阻接近时, 获得最佳的电流扩展均匀性, 而p-GaN与n-GaN厚度的选取要根据实际情况来决定。这次工作将为今后实际器件的设计提供指导意义, 特别是在大功率的GaN基发光二极管的设计上。

参考文献:

- [1] 艾伟伟, 郭霞, 刘斌, 等. 电流拥挤效应对 GaN 基发光二极管可靠性的影响 [J]. 激光与红外, 2006, 36(6): 491-494.
- [2] KIM H, PARK S J, HWANG H. Effects of current spreading on the performance of GaN-based light-emitting [J]. IEEE Transaction on Electron Devices, 2001, 48(6): 1065-1069.
- [3] KIM H, LEE J M, HUH C, et al. Modeling of a GaN-based light-emitting diode for uniform current spreading [J]. Appl Phys Lett, 2000, 77: 1903-1904.
- [4] KIM H, PARK S J, HWANG H, et al. Lateral current transport path, a model for GaN-based light-emitting diodes: applications to practical device designs [J]. APL, 2002, 81(7): 1326-1328.
- [5] KIM H, PARK S J, HWANG H. Design and fabrication of highly efficient GaN-based light-emitting diodes [J]. IEEE Transaction on Electron Devices, 2002, 49(10): 1715-1722.
- [6] EBONG A, ARTHUR S, DOWNEY E, et al. Device and circuit modeling of GaN/InGaN light emitting diodes (LEDs) for optimum current spreading [J]. SSE, 2003, 47: 1817-1823.
- [7] 田洪宇, 余志平, 田立林, 等. 混合信号电路的衬底电阻网络模型 [J]. 微电子学, 2003, 33(1): 1-4.
- [8] GUO X, SCHUBERTA E F. Current crowding in GaN/InGaN light emitting diodes on insulating substrates [J]. Journal of Applied Physics, 2001, 90(8): 4191-4195.
- [9] GUO X, SCHUBERTA E F. Current crowding and optical saturation effects in GaInN/GaN light-emitting diodes grown on insulating substrates [J]. APL, 2001, 78(21): 3337-3339.

(收稿日期: 2007-05-23)

作者简介:

毛明华(1976—), 男, 硕士研究生, 研究方向为 III-V 族半导体光电器件;

刘宝林(1963—), 男, 江西人, 博士, 教授, 主要从事 MOCVD 光纤通信及宽禁带材料生长和光电器件的研究。