

采用碳纳米管改善 GaN HEMT 器件结构散热

张国斌^{1,2}, 赵 妙¹, 吴宗刚¹

(1 中国科学院微电子研究所, 北京 100029; 2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 自热效应是影响 GaN HEMT 器件特性的一个重要因素, 本文我们对比研究了不同衬底的 GaN HEMT 器件传统封装、倒装结构的热特性, 并采用高热导率的碳纳米管改善倒装器件散热. 从仿真结果看, 倒装结构对器件的散热能力有一定提升, 而碳纳米管又增强了倒装结构的散热能力. 采用碳纳米管的倒装结构使得以蓝宝石、硅和碳化硅为衬底的器件总热阻分别降低了 77.1%、50.6%、32.9%. 因此, 碳纳米管能够改善倒装结构的散热, 并增强器件的特性和可靠性.

关键词: GaN HEMT; 碳纳米管; 倒装; 散热;

中图分类号: TN303

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2018)12-0095-04

Improved Heat Dissipation in GaN HEMT with Carbon Nanotubes

ZHANG Guo-bin^{1,2}, ZHAO Miao¹, WU Zong-gang¹

(1 Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Self-heating is a very severe factor for GaN HEMT performance. In this paper, we comparative study thermal characteristics of the conventional packaging and flip-chip GaN HEMT devices with various substrates and improve heat dissipation of the flip-chip devices by using carbon nanotubes with high thermal conductivity. From the results, flip-chip lower temperature of device, while the carbon nanotubes increase the heat dissipation of flip-chip. The thermal resistance of devices with sapphire, Si and SiC substrates decreased by 77.1%, 50.6% and 32.9%, respectively, with carbon nanotubes. Therefore, carbon nanotubes can improve the heat dissipation of the flip-chip structure and enhance the performance and reliability of the device.

Key words: GaN HEMT; carbon nanotubes; flip-chip; heat dissipation

1 引言

作为第三代半导体材料的代表, GaN 具有宽的禁带宽度(3.4 eV)、高击穿场强(3.3 MV/cm)以及高的二维电子气浓度($>10^{13} \text{ cm}^{-2}$), 因此 AlGaIn/GaN HEMT 器件显示出大电流、高击穿电压、大功率、高效率以及优良的微波特性. 然而, 随着 GaN HEMT 器件功率的提升, 自热效应却成为影响 GaN HEMT 器件特性的主要问题之一. 高的器件温度导致器件电流、增益和输出功率的下降, 以及漏电流的增加和可靠性降低. 在封装中多采用倒装(flip-chip)技术^[1], 然而, 由于在倒装焊的过程中采

用的焊料热导率较低(一般为 50~60 W/m·K), 限制了热量的传导, 进而使得倒装结构的散热能力受到一定的限制.

碳纳米管(CNTs)是一种很有前途的材料, 尤其是具有高导热性($>3000 \text{ W/m} \cdot \text{K}$), 并且可以形成高宽比的结构^[2,3]. 目前, 在不同基质上定向生长 CNTs 的技术已较为成熟, 可大规模制备高纯度、高密度、任意分布的自排列 CNTs 阵列^[4,5]. 因此, 可将 CNTs 制备在 AlN 陶瓷基板上实现 GaN HEMT 器件的倒装, 并增强器件倒装结构的散热能力.

本文对倒装技术的散热原理进行了分析, 给出

了倒装形式下的热阻模型,并通过有限元仿真技术对不同衬底的 GaN HEMT 器件在传统封装、倒装和 CNTs 作为键合材料的倒装结构进行了仿真分析,仿真结果证明了采用 CNTs 作为倒装结构的键合材料能够有效提升器件散热能力.

2 倒装技术原理与热阻模型

倒装技术是一种将有源器件管芯翻转,通过凸点将管芯焊接到另一块基板上的方法,其基本原理结构如图 1 所示.对于大功率的 AlGaN/GaN HEMTs 器件本实验中使用高热导率的 AlN($K=200\text{ W/m}\cdot\text{K}$)陶瓷作为基板材料.

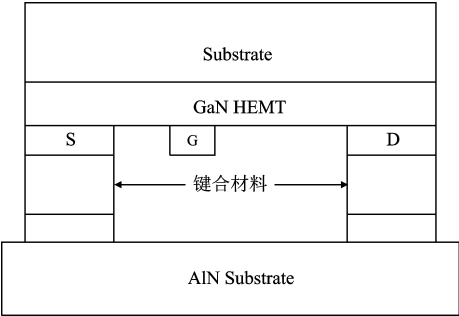


图 1 倒装结构示意图

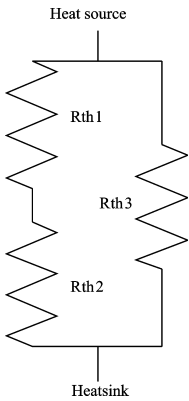


图 2 倒装热阻模型示意图

能够代表器件散热能力好坏的参数为热阻,我们通过热阻模型分析采用倒装技术和采用 CNTs 键合材料前后器件散热性能的变化.倒装器件的热阻模型如图 2 所示,而传统封装器件的热流从沟道向衬底纵向流动,热阻主要表现为 GaN 层, GaN 与衬底界面和衬底形成的热阻 R_{th3} ;而采用倒装形式后器件的热流将分为两部分,一部分仍然沿器件纵向流向衬底,而另一部分流向 AlN 基板,热阻主要包括键合点热阻 R_{th1} 和 AlN 基板的热阻 R_{th2} .倒装前后器件的整体热阻可由热阻模型进行计算,传统

封装器件热阻为 R_{th3} ,而倒装器件的总热阻为 R_{th1} , R_{th2} 串联再与 R_{th3} 并联,从而,达到降低总热阻的目的,而采用 CNTs 作为键合材料的倒装器件其 R_{th1} 较普通倒装的小,因而采用 CNTs 作为键合材料的倒装器件总热阻会更低.

3 器件结构与参数

在仿真中我们使用十指的 AlGaN/GaN HEMTs 作为研究对象,器件整体结构如图 3 所示.器件的具体结构包括 25 nm 的 AlGaN(铝组分为 30%)层、1.855 μm 的 GaN 层、100 μm 的 4H-SiC 绝缘衬底和 120 nm 的 SiN_x 钝化层.源漏间距为 6 μm ,栅源间距为 1.8 μm ,栅漏间距为 4 μm .由器件的结构图可以看出器件水平和垂直方向是对称的,因此,为了简化模型提高仿真效率,只需对 1/4 的器件进行建模即可.器件的其他参数为: $L_{die}=250\text{ }\mu\text{m}$, $W=50\text{ }\mu\text{m}$, $W_{die}=150\text{ }\mu\text{m}$, $L_{gdg}=28\text{ }\mu\text{m}$, $L_{gsg}=24\text{ }\mu\text{m}$, $L_A=140\text{ }\mu\text{m}$.然后,器件通过金锡焊料将器件焊接在 380 μm 厚的 AlN 陶瓷基板上实现器件的倒装.

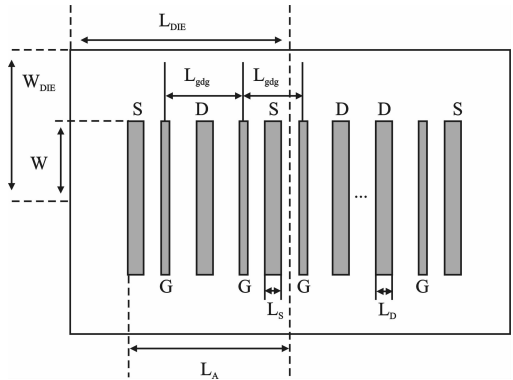


图 3 器件结构图

采用 CNTs 作为倒装键合材料与传统的倒装工艺不同.首先,在 AlN 陶瓷基板上选择性的淀积一层催化剂用于生长 CNTs;再通过化学气象淀积(CVD)的方法生长多壁碳纳米管(MWCNTs);然后,在 MWCNTs 上电镀一层金金属;最后将器件倒扣在基板上通过热压法实现器件与基板的键合^[6,7].

材料的热导率通常是与温度相关的,因此, GaN、蓝宝石衬底、Si 衬底和 SiC 衬底的热导率采用以下表达式进行模拟计算^[8,9]:

$$K_{\text{GaN}}(T)=1.6\left(\frac{T}{300}\right)-1.4(W/cm\cdot K)\quad (1)$$

$$K_{\text{Sapphire}}(T) = 0.35 \left(\frac{T}{300} \right) - 1 (\text{W/cm} \cdot \text{K}) \quad (2)$$

$$K_{\text{Si}}(T) = 1.5 \left(\frac{T}{300} \right) - 1.3 (\text{W/cm} \cdot \text{K}) \quad (3)$$

$$K_{\text{SiC}}(T) = 3.4 \left(\frac{T}{300} \right) - 1.5 (\text{W/cm} \cdot \text{K}) \quad (4)$$

AlGaN, SiN_x, Au 和金锡焊料的热导率分别为 30 W/m · K、1.85 W/m · K、320 W/m · K 和 57 W/m · K. CNTs 热导率虽然很高,但阵列中碳纳米管有效的体积填充系数约为 20%,即在面积为 A 的阵列中,实际上只有约 0.2 A 的面积是实际参与导热的,因此,经填充系数修正后, MWCNTs 的热导率在 300~700 W/m · K 范围内^[10],仿真中我们选取 MWCNTs 的热导率为 500 W/m · K, MWCNTs 高度与焊料的厚度均为 10 μm.

另外,除了器件中各材料热导率之外,在评估器件热性质时还必须考虑界面及其相关热导率的存在. 界面热阻的存在不仅会导致界面处温度的不连续,而且界面热阻的大小也直接影响器件的峰值温度,因此,在仿真中界面热阻的因素不可忽略. 基于前人的研究,我们将 GaN 与蓝宝石、Si 和 SiC 衬底之间的界面热阻分别设置为 $1.2 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ 、 $3.3 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ 和 $3.3 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ ^[9].

4 结果与讨论

我们针对不同衬底的 GaN HEMTs 进行了传统封装、倒装和采用 MWCNTs 为键合材料的倒装结构进行了热分析. 在仿真模型中我们将传统封装的器件衬底底部作为边界条件并设置为室温 (25℃);对于倒装结构将衬底底部与 AlN 陶瓷基板底部作为边界条件并设置为室温 (25℃).

由于不同衬底的 GaN HEMTs 器件散热能力不同,所以我们将蓝宝石、Si 和 SiC 衬底器件功率别设置为 2 W/mm、8 W/mm 和 12 W/mm,并在不同的封装形式下进行仿真模拟. 图 4 展示了 SiC 衬底 GaN HEMTs 传统倒装结构与采用 MWCNTs 键合材料的倒装结构温度分布对比. 从温度分布结果可以看出:采用 MWCNTs 键合材料的倒装结构比传统倒装结构峰值温度低了 20℃,而且 AlN 基板的热分布也较均匀. 这说明 MWCNTs 将更多的热量从器件传至基板.

另外,图 5 给出了不同衬底材料在三种结构下的峰值温度. 从图中可以看出三种衬底的器件在采用倒装结构之后器件峰值温度都有明显的降低,而且随着衬底热导率的降低倒装结构对器件散热能力

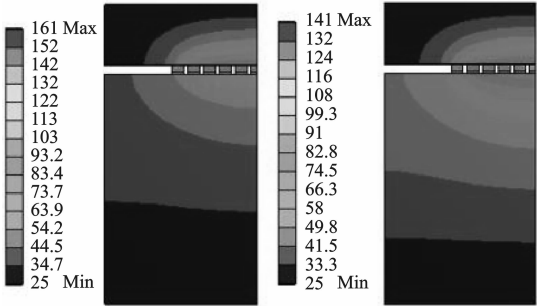


图 4 SiC 衬底 GaN HEMTs 传统倒装结构(左)与采用 MWCNTs 材料的倒装结构(右)温度分布对比

提升就越大. 另外,当采用高热导率的 MWCNTs 作为倒装键合材料后,器件的峰值温度较采用金锡焊料的倒装结构又有一定的降低.

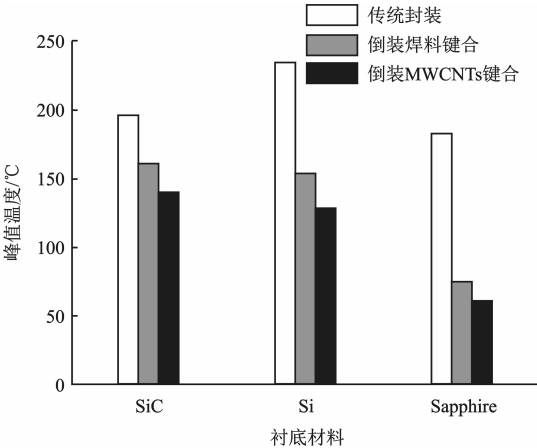


图 5 以蓝宝石, Si 和 SiC 为衬底的 GaN HEMTs 器件分别在 2 W/mm、8 W/mm 和 12 W/mm 的功率下在不同封装结构中的峰值温度

通过不同结果器件的温度我们利用热阻计算公式 $R_{th} = \frac{T - T_r}{P}$ 可以得到器件的热阻值,其中 T 为峰值温度, T_r 为参考温度 (即室温), P 为器件所加功率. 图 6 的结果给出了不同结构的 GaN HEMTs 器件的热阻值. 从结果中可以看出在传统封装中蓝宝石衬底的 GaN HEMTs 器件热阻最大,高达 78.9°C/W 这主要是由于蓝宝石衬底的热导率较低,而且器件产生的热量是通过衬底传向外部环境. 而采用倒装结构之后蓝宝石, Si 和 SiC 为衬底的 GaN HEMTs 器件热阻分别降低了 68.3%、38.3%、20.2%;而采用 MWCNTs 的倒装结构使得热阻在其基础上分别又降低了 27.6%、19.9%、15.8%,与传统封装结构相比热阻分别降低了 77.1%、50.6%、32.9%. 随着键合材料热导率的升高器件的热

阻随之下降,但对于衬底热导率较低的器件热阻降低的越大. 因此,采用 MWCNTs 的倒装结构器件能够得到更低的热阻.

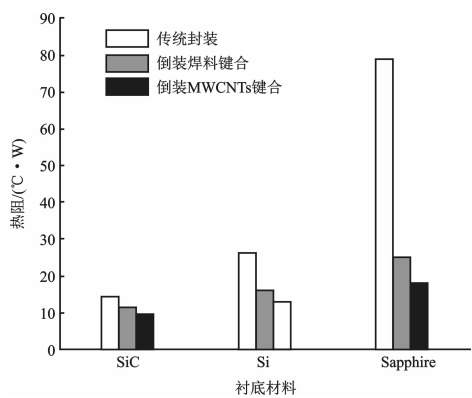


图 6 以蓝宝石,Si 和 SiC 为衬底的 GaN HEMTs 器件在不同封装结构中的热阻

4 结束语

本文通过有限元分析软件对不同衬底材料(蓝宝石,Si 和 SiC)和不同封装结构的 GaN HEMTs 器件进行了热分析. 从仿真结果看,倒装结构能够有效降低器件的总热阻,但对于不同衬底材料的器件倒装结构的降温程度不同:衬底材料热导率高的器件温度降低少,而衬底热导率低的温度降低多. 当倒装结构采用热导率较高的 MWCNTs 作为键合材料时,器件的总热阻又有一定程度降低. 另外,对于采用 MWCNTs 键合材料的倒装结构比采用金锡焊料的倒装结构器件的热阻更小. 因此,基于 MWCNTs 键合材料的倒装 GaN HEMTs 更利于器件的散热,并提高器件可靠性.

参考文献:

[1] Sun J, Fatima H, Koudymov A, et al. Thermal management of AlGaIn-GaN HFETs on sapphire using flip-chip bonding with epoxy underfill[J]. Electron Device Letters IEEE, 2003, 24(6):375-377.

[2] Kim P, Shi L, Majumdar A, et al. Thermal transport measurements of individual multiwalled nanotubes. [J]. Physical Review Letters, 2001, 87(21):215502.

[3] Shioya H, Iwai T, Kondo D, et al. Evaluation of Thermal Conductivity of a Multi-Walled Carbon Nanotube Using the ΔV_{gs} Method[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2007,46.

[4] Chein R, Huang G. Analysis of microchannel heat sink performance using nanofluids[J]. Applied Thermal Engineering, 2005, 25(17-18): 3104-3114.

[5] Zhu L, Sun Y, Xu J, et al. Aligned carbon nanotubes for electrical interconnect and thermal management [C]// Electronic Components and Technology Conference, 2005. Proceedings. IEEE, 2005:44-50 .

[6] Soga I, Kondo D, Yamaguchi Y, et al. Thermal management for flip-chip high power amplifiers utilizing carbon nanotube bumps[C]// IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology. IEEE, 2010:221-224.

[7] Kondo D, Sato S, Kawabata A, et al. Selective growth of vertically aligned double-? and single-walled carbon nanotubes on a substrate at 590a°C [J]. Nanotechnology, 2008, 19(43):435-601.

[8] Sarua A, Ji H, Hilton K P, et al. Thermal Boundary Resistance Between GaN and Substrate in AlGaIn/GaN Electronic Devices[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2007, 54(12):3152-3158.

[9] Chang Y, Zhang Y, Zhang Y, et al. A thermal model for static current characteristics of Al Ga N / Ga N, high electron mobility transistors including self-heating effect[J]. Journal of Applied Physics, 2006, 99(4): 117-5.

[10] 陈强, 黄永华, 王如竹. 碳纳米管材料的热导率及其衡量新方法探究 [J]. 科学通报, 2013 (33): 3403-3408.

作者简介:

张国斌 男,(1989-),硕士研究生. 研究方向为第三代半导体功率器件热分析和测试方向.
E-mail:zhangguobin@ime. ac. cn.

吴宗刚 男,(1991-),硕士研究生. 研究方向为石墨烯器件方向.

赵 妙 女,(1979-),博士,副研究员. 研究方向为微波器件与电路可靠性方向.