

基于 FC 技术的 AlGaN/GaN HEMT^{*}

陈晓娟 刘新宇 邵刚 刘键 和致经 汪锁发 吴德馨

(中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

摘要: 采用 FC 技术将管芯倒扣至 AlN 基板散热的 AlGaN/GaN HEMTs, 并通过热阻模型分析了 FC 方式的散热机理. 从测试结果看, 器件的热阻可大幅降到 $14.9 \text{ K} \cdot \text{mm}^2/\text{W}$, 直流特性明显增加, 饱和电流提高 33%. 表明采用 FC 技术有效改善了器件散热, 而且引入的寄生电感较小, 可获得更大输出功率. 如果进一步完善频率特性的优化, 可以加快 FC 技术的 AlGaN/GaN 大功率 HEMT 器件的实用化进程.

关键词: AlGaN/GaN; HEMT; FC; 倒扣; 热阻

EEACC: 2570

中图分类号: TN325+.3 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2005)05-0990-04

1 引言

GaN 是新一代的宽禁带半导体材料, 具有宽的禁带宽度 (3.4 eV)、高击穿场强 (3.3 MV/cm) 以及很高的二维电子气浓度 ($> 10^{13} \text{ cm}^{-2}$), 因此 AlGaN/GaN HEMT 显示出大电流、高击穿电压、大功率、高效率及很好的微波性能. 国际上对 AlGaN/GaN 器件的讨论非常活跃, GaN 器件的最大输出电流已经可以达到 $2.1 \text{ A/mm}^{[1]}$, 最高跨导可以达到 525 mS/mm , 击穿电压在 600V 以上^[2]. SiC 衬底下, 4GHz 微波功率密度最高可达 32 W/mm , SiC 衬底 GaN 单指器件 f_T 大于 160GHz, 蓝宝石衬底 f_T 大于 110GHz.

然而, 对于在蓝宝石衬底上的 GaN 器件, 尽管具有低成本和大晶圆尺寸的优点, 但是器件的性能总是要低于前面报道的 SiC 衬底上的器件. 蓝宝石材料热导率较差, 使得器件的自热效应非常严重, 限制了器件的有效功率容量, 同时高的沟道温度使得器件的可靠性降低. 目前国际上蓝宝石衬底的 AlGaN/GaN 功率器件一般使用倒装 (flip-chip, FC) 技术将芯片倒装在 AlN ($= 180 \text{ W/(cm} \cdot \text{K)}$) 上实现器件的散热, 同时 AlN 也充当低成本的电路板, 采用 FC 技术的 GaN FET 和电路已经显示了较

高的性能^[3~5].

本文对 FC 的散热原理进行了分析, 给出了 FC 形式下的热阻模型, 并在国内首次研制出基于 FC 技术的 AlGaN/GaN HEMT 器件, 对器件进行了直流和高频测试, 采用 FC 技术后, AlGaN/GaN 器件的热阻显著降低, 器件的热效应明显改善.

2 FC 原理与模型

FC 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, 在微波电路领域经常用于有源器件与电路基板的组装, 其基本原理如图 1 所示. 对于 AlGaN/GaN 微波大功率电路制作, FC 还常用于器件的散热, 本实验使用的基板为高热导率的 AlN 陶瓷基板.

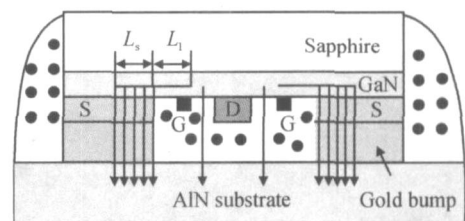


图 1 FC 示意图

Fig. 1 Schematic of FC bonding on AlN

* 国家重点基础研究发展规划 (批准号: 2002CB311903) 和中国科学院重点创新 (批准号: KG CX2-SW-107) 资助项目

陈晓娟 女, 1979 年出生, 硕士研究生, 从事化合物半导体器件与电路的研究.

刘新宇 男, 1973 年出生, 研究员, 从事化合物半导体器件与电路的研究.

2004-05-02 收到, 2004-12-11 定稿

器件热效应会使器件的性能严重恶化,在 HEMT 器件的模型中往往通过在等效电路的源端串联一个与温度相关的热阻 R_{th} 反映热效应对器件性能的影响.源端热阻对本征器件的漏偏压有负反馈作用,表现为在高直流功率下器件偏压降低, I_{ds} 出现下降的趋势,这种趋势随着串联热阻的增大而越发严重,且沟道温度随热阻的增大而急剧升高.

我们通过热阻模型分析采用 FC 技术前后器件性能的改善.器件的热阻一般定义为^[6]:

$$R_{th} = \frac{T}{P} = \frac{\bar{T} - T_0}{I_{ds} V_{ds}} \quad (1)$$

其中 \bar{T} 为热导率 γ 为定值时的沟道温度, T_0 为 300 K,但热导率通常与温度相关, $\gamma(T) = \gamma(T_0) \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-b}$, 沟道温度修正为^[7]:

$$T = \left[\frac{\bar{T} - b(\bar{T} - T_0)}{T_0^b} \right]^{1/(1-b)} \quad (2)$$

FC 前后器件的热阻模型如图 2 所示,倒扣前,器件的热流从沟道向衬底纵向流动,热阻主要表现为 GaN 蓝宝石衬底形成的热阻 R_{th1} ;而 FC 倒扣后器件的热流将分成两部分,一部分流向 AlN 基板,主要包括 GaN 缓冲层热阻 R_{th2} 以及凸点热阻 R_{th3} ,另一部分仍然沿器件纵向流动. FC 前后器件的沟道温度可由 (1) 和 (2) 式近似估算,倒扣后由于 R_{th2} , R_{th3} 较小,又与 R_{th1} 是并联关系,因此总的热阻大大减小,器件的沟道温度降低.

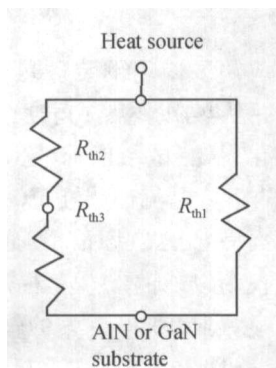


图 2 FC 热阻模型

Fig. 2 An specific thermal impedance network of FC bonding

R_{th2} 为 GaN 缓冲层热阻,可表示为:

$$R_{th2} = (1/\gamma_2)(L_1 + L_s)/d \quad (3)$$

其中 L_s 为有效热长度.

$$L_s = \sqrt{\frac{2}{N_3}} dh \quad (4)$$

其中 d 为 GaN 缓冲层厚度; h 为金凸点高度; γ_2 ($1.6\text{W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$), γ_3 ($3\text{W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$) 分别为 GaN 和金凸点的热导率.由 (4) 式可见 L_s 与器件的结构无关,而与器件材料结构和倒扣方式有关. $L_1 = L_g + L_{gs}$, 栅源间距 L_{gs} 为 $1.6\mu\text{m}$, 栅长 L_g 为 $0.8\mu\text{m}$, L_1 不会随着 FC 的引入而改变. R_{th3} 为金凸点热阻,在 FC 方式下,由于热量散发较快,这项较小,可表示 $R_{th3} = \ln\left(\frac{16h}{L_s}\right)/\gamma_3$, R_{th1} 为器件蓝宝石衬底的热影响,用蓝宝石热导系数 $0.05\text{W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$ 代替 γ_3 可由 (3) 式得出 R_{th1} .

3 器件工艺与制作

AlGaIn/ GaN 外延材料由中国科学院半导体研究所提供,采用金属有机物化学气相沉积 (MOCVD) 技术生长,衬底为蓝宝石.室温下二维电子气的浓度为 $1.3 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$, 迁移率为 $1120\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$.

用于倒扣的 GaN 管芯尺寸为 $0.8\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$, 器件隔离使用 ICP 干法刻蚀实现,源漏欧姆接触采用 Ti/ Al/ Ti/ Au 金属结构,在 730°C N_2 氛围中退火 50s. 栅金属采用 Pt/ Ti/ Au. AlN 基板采用进口陶瓷材料,该基板上交流引线使用 CPW 传输线以减小传输损耗.凸点制备采用电镀工艺,制作出的金凸点高度约 $10\mu\text{m}$.

采用 Semiconductor Equipment 公司的 410 型倒扣焊机完成器件与散热基板的焊接,为保护器件,倒扣焊接时温度保持较低,时间较短,最终得到的 GaN 倒扣器件如图 3 所示.

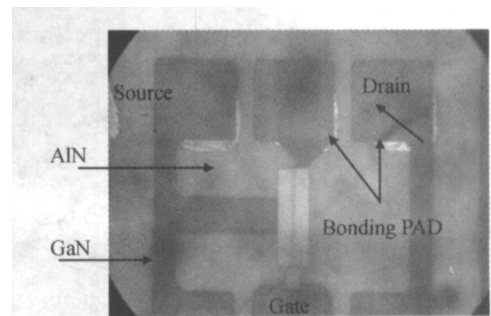


图 3 采用 FC 的 AlGaIn/ GaN HEMT 照片

Fig. 3 Photographic of AlGaIn/ GaN HEMT using FC bonding

4 结果与讨论

器件采用 HP4142 和 Agilent ICCAP 进行了直流和高频的测试,并和 FC 前的结果进行了对比,图 4 给出了 FC 前后器件的 $I-V$ 特性对比图.可以明显观察到,倒扣封装后器件的输出电流增加,在 $V_{gs} = 1V$ 时,饱和输出电流从 $300\text{mA}/\text{mm}$ 显著增加到 $396\text{mA}/\text{mm}$,提高了近 33%.此外,电流输出曲线更加平直.倒装前,器件在 $V_{ds} = 10V$ 下就已经出现了明显的电流下降趋势,表明倒装前,高直流功率下,器件的热阻较大,对电流的输出影响比较严重;而倒装后,由于散热性能得以改善,在更大直流功率条件下 $V_{ds} = 15V$,电流下降的趋势仍不明显,器件的最高跨导 $110\text{mS}/\text{mm}$,源漏关态击穿电压大于 $70V$.使用 Cripps 方法^[7]: $P_{out} = I_{max}(V_{br} - V_{knee})/8$,估算器件在甲类放大偏置 $V_{ds} = 30V$ 下的最大输出功率密度从倒扣前的 $0.98\text{W}/\text{mm}$ 增大到约 $1.31\text{W}/\text{mm}$.

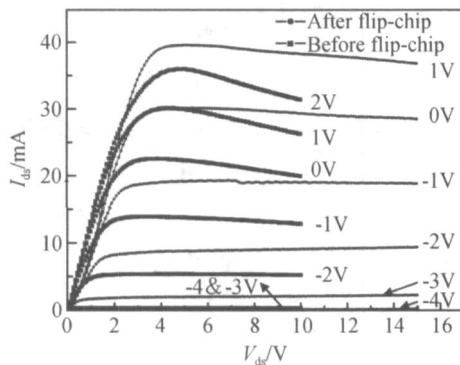


图 4 FC 前后器件 $I-V$ 特性

Fig. 4 DC $I-V$ characteristics of AlGaIn/GaN HEMT before and after FC bonding

从直流测试结果可观察到,采用 AlN 作热沉的 AlGaIn/GaN HEMT 散热性能明显改善,这依赖于热阻的减小.倒扣前的热阻主要为蓝宝石衬底层的热阻也就是 R_{th1} ,根据公式(1),用蓝宝石热导系数 $0.05\text{W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$ 代替 α ,可得到有效热长度 L_s 大约在 $31\mu\text{m}$ 左右,比器件的源漏间距大得多,而热阻更高达 $67.5\text{K} \cdot \text{mm}/\text{W}$.根据公式(1),(2),直流偏置下沟道温度达到 120 左右,因此可知倒扣前,蓝宝石衬底上有非常剧烈的热加温现象.

电镀金凸点高度 $h = 10\mu\text{m}$, GaN 缓冲层厚度 $d = 3\mu\text{m}$,采用 FC 后,由公式(3),(4),计算出栅源的

热阻 R_{th2} 为 $16.0\text{K} \cdot \text{mm}/\text{W}$,而凸点的热阻 R_{th3} 则要小很多,只有 $3.1\text{K} \cdot \text{mm}/\text{W}$,三个热阻按图 2 连接关系,总热阻只有 $14.9\text{K} \cdot \text{mm}/\text{W}$,比倒扣前热阻小很多,按此热阻,采用 FC 后,沟道的温度只有 50 左右.可见采用 FC 后器件的沟道温度下降,因此器件输出电流增加,输出功率增大,可靠性提高.为以后大功率器件的研制打下了良好的基础.

对倒扣后的管芯进行了高频测试,图 5 给出了器件的最大功率资用增益 MAG 和电流增益 H21 曲线.倒扣后器件的 f_T 下降到 6GHz ,截止频率的下降与倒扣时引入了较大的寄生电容有关.说明倒扣管芯结构并不是最优,还需不断完善,但是 f_{max} 仍在 16GHz 以上,在 4GHz 下,理想功率增益可达 12.75dB ,可见 FC 凸点引入的源电阻和源电感很小,因此 f_{max} 的降低并不显著.如果进一步优化倒扣结构,相信使用 FC 技术的器件性能会大大提高.

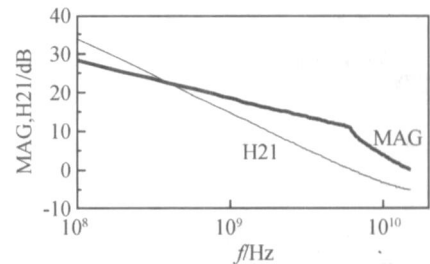


图 5 倒扣后器件 MAG 和 H21

Fig. 5 MAG and H21 of the device after FC bonding

5 结论

本文研制成功了使用倒装散热的 AlGaIn/GaN HEMT 器件,并从热阻模型的角度分析了倒扣前后器件热阻的变化.从测试结果看,饱和输出电流增大了 33%,器件的 $I-V$ 电流曲线在 FC 后更加平直,随直流功率增大而减小的趋势很小.通过计算,FC 后的器件总热阻仅为以前的 $1/5$ 左右,FC 对器件性能的改善非常明显,可以获得更大的输出功率,FC 引入的电感较小,器件的 f_{max} 在 16GHz 左右.基于 FC 散热的 AlGaIn/GaN HEMT 的研制成功为以后更大功率器件的研究与应用奠定了重要基础.

参考文献

- [1] Chini A, Coffie R, Meneghesso G, et al. $2.1\text{A}/\text{mm}$ current density AlGaIn/GaN HEMT. IEEE Electron Lett, 2003, 39 (7): 625

- [2] Saito W , Takada Y , Kuraguchi M , et al. High breakdown voltage AlGaIn- GaN power- HEMT design and high current density switching behavior. *IEEE Trans Electron Devices* ,2003 , 50(12) :2528
- [3] Wu Y F , Kapolnek D , Ibbetson J P , et al. Very-high power density AlGaIn/ GaN HEMTs. *IEEE Trans Microw Theory Tech* ,2001 ,48 :586
- [4] Xu J J , Wu Y F , Keller S , et al. 1-8- GHz GaN-based power amplifier using FC bonding. *IEEE Microw Guided Wave Lett* ,1999 ,9 :277
- [5] Xu J J , Keller S , Parish G , et al. A 3-10- GHz GaN-based FC integrated broad-band power amplifier. *IEEE Trans Microw Theory Tech* ,2000 ,48 :2573
- [6] Walker J L B. High-power GaAs FET amplifiers. Artech House ,1993 :2573
- [7] Lee J W , Webb K J. A temperature-dependent nonlinear analytic model for AlGaIn- GaN HEMTs on SiC. *IEEE Trans Microw Theory Tech* ,2004 ,52(1) :2
- [8] Nuttinck S , Wagner B K , Banerjee B , et al. Thermal analysis of AlGaIn- GaN power HFETs. *IEEE Trans Microw Theory Tech* ,2003 ,51(12) :2445

AlGaIn/ GaN HEMT on Sapphire Using FC Bonding *

Chen Xiaojuan , Liu Xinyu , Shao Gang , Liu Jian , He Zhijing , Wang Suofa , and Wu Dexin

(*Institute of Microelectronics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100029 , China*)

Abstract : AlGaIn/ GaN HEMT grown on sapphire substrates using FC bonding for heat dissipation is demonstrated and the mechanism of FC bonding is discussed. A model based on thermal impedance is used to analyze the heat which is dissipated by FC bonding. The tested result shows ,after FC , a much reduced thermal impedance of 14. 9W/ (cm · K) , and a increased saturation current from 300mA/ mm to 396mA/ mm are obtained. Source-drain current drop in high DC power is not obviously observed in FC FET. So the AlGaIn/ GaN HEMT using FC bonding has good heat-dissipation performance and large output power.

Key words : AlGaIn/ GaN ; heterostructure field effect transistors ; FC ; thermal impedance

EEACC : 2560S

Article ID : 0253-4177(2005)05-0990-04

* Project supported by State Key Development Program for Basic Research of China(No. 2002CB311903) and Key Program of Chinese Academy of Sciences(No. KGX2-SW-107)

Chen Xiaojuan female ,master candidate. She is engaged in the research on compound semiconductor devices and circuits.

Liu Xinyu male ,professor. He is engaged in the research on compound semiconductor devices and circuits.

Received 2 May 2004 ,revised manuscript received 11 December 2004

© 2005 Chinese Institute of Electronics