

非掺杂 AlGaN/GaN 微波功率 HEMT

陈堂胜 焦 刚 薛舫时 曹春海 李拂晓

(南京电子器件研究所, 南京 210016)

摘要: 报道了研制的 AlGaN/GaN 微波功率 HEMT, 该器件采用以蓝宝石为衬底的非掺杂 AlGaN/GaN 异质结构, 器件工艺采用了 Ti/Al/Ni/Au 欧姆接触和 Ni/Au 肖特基势垒接触以及 SiN 介质进行器件的钝化。研制的 $200\mu\text{m}$ 栅宽 T 型布局 AlGaN/GaN HEMT 在 1.8GHz , $V_{ds} = 30\text{V}$ 时输出功率为 28.93dBm , 输出功率密度达到 3.9W/mm , 功率增益为 15.59dB , 功率附加效率(PAE)为 48.3% 。在 6.2GHz , $V_{ds} = 25\text{V}$ 时该器件输出功率为 27.06dBm , 输出功率密度为 2.5W/mm , 功率增益为 10.24dB , PAE 为 35.2% 。

关键词: 宽禁带半导体; AlGaN/GaN; 高电子迁移率晶体管; 微波大功率

EEACC: 1850F; 1220

中图分类号: TN 72

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2004)01-0069-04

1 引言

固态化是微波功率器件发展的方向, GaAs 肖特基场效应晶体管(FET)以其优良的频率特性和功率特性在固态微波功率器件中发挥着重要作用, 特别是能带工程的出现进一步奠定了 GaAs 基 FET 在微波功率器件中的主导地位。随着对输出功率的要求不断提高, GaAs 材料较低的热导率和较低的击穿场制约了 GaAs FET 在固态大功率方面的发展, 另外尽管多芯片合成可以实现大功率输出, 但由于大栅宽 GaAs 功率 FET 的阻抗太低, 进行内匹配和功率合成的难度很大, 人们一直在寻找一种更适合于固态大功率要求的器件。二十世纪末, 以 AlGaN/GaN HEMT 为代表的宽禁带半导体器件的出现较好地迎合了这一需求。GaN 有较 GaAs 更宽的禁带、更高的击穿场强、更高的电子饱和速度。作为大功率应用, GaN 的热导率是 GaAs 的 3 倍, 用于生长 AlGaN/GaN 外延层的 SiC 衬底的热导率是 GaAs 的 9 倍, 有效地改善了器件的散热特性。另外, AlGaN/GaN 异质结构不仅具有较 GaAs PHEMT 中 AlGaAs/InGaAs 异质结构更大的导带偏移, 而且在异质界面附近产生很强的自发极化和压电极化, 感生出很强的界面电荷和电场, 积聚起高

密度的二维电子气, 这种二维电子气可以由不掺杂势垒层中的电子转移来产生, 消除了电离散射中心的影响。GaN 材料的这些特点决定了 AlGaN/GaN HEMT 不仅具有优异的微波功率特性, 其单位毫米栅宽输出功率理论上可达到几十瓦, 远大于 GaAs 基微波功率器件, 而且其宽禁带特点决定它可以承受更高的工作结温, 作为新一代的微波功率器件, AlGaN/GaN HEMT 将成为微波大功率器件发展的方向。

近几年来, AlGaN/GaN HEMT 的研究飞速发展, 研制出的 $0.15\mu\text{m}$ 栅长的 AlGaN/GaN HEMT 其电流增益截止频率 f_T 超过 100GHz ^[1], 与 GaAs 基异质结器件的频率特性相近。SiC 衬底的 AlGaN/GaN HEMT 在 10GHz 输出功率密度为 10.7W/mm , 功率附加效率为 40% ^[2]。尽管蓝宝石衬底上的 AlGaN/GaN HEMT 受散热的限制, 在 8GHz 时输出功率密度也能达到 6.5W/mm , 功率增益为 9.1dB , 功率附加效率为 51% ^[3]。其他具有实用意义的 AlGaN/GaN HEMT 也相继推出, 已研制出在 6GHz 脉冲输出功率为 51W 的功率放大器, 该器件的总栅宽为 8mm , 倒装在 AlN 基片上形成单片集成电路^[4]。还有类似的 AlGaN/GaN 功率单片电路, 4mm 栅宽的器件在 8GHz 连续波输出功率为 14W ^[3]。近几年来, 国内也在开展 AlGaN/GaN

HEMT 的研究, 总体水平与国外相比有较大差距, 目前还没有具有微波功率特性的 AlGaN/GaN HEMT 研究结果的报道。本文将报道正在研制的蓝宝石衬底上 AlGaN/GaN HEMT 的器件工艺技术和器件的初步结果。

2 器件结构及器件工艺

图 1 给出了典型的非掺杂 AlGaN/GaN HEMT 结构示意图。在蓝宝石或 SiC 衬底上先低温生长一薄层 GaN 或 AlN 成核层, 然后在高温下生长 i-GaN 缓冲层, 为提高 GaN 层的生长质量, i-GaN 缓冲层一般厚 1~2 μm, 最后生长 i-AlGaN 势垒层。GaN 和 AlGaN 的极性是决定器件性能和外延层缺陷密度

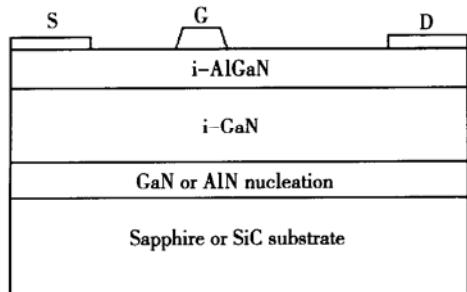


图 1 AlGaN/GaN 功率 HEMT 截面示意图

Fig. 1 Schematic cross-section of the AlGaN/GaN power HEMT

的一个重要物理特性。目前高质量 GaN 和 AlGaN 外延层都呈 Ga 面, AlN 和 GaN 都是极性材料, 且 AlN 的自发极化比 GaN 的强, 因而在 AlGaN/GaN 异质结界面产生一层净自发极化正电荷。在 GaN 上生长的 AlGaN 产生的张应力导致压电极化的形成, 压电极化与自发极化相叠加, 在 AlGaN/GaN 异质结界面形成一层净正电荷, 这层净正电荷在 GaN 表面附近的二维电子势阱中感应出二维电子气。因此该结构的器件中二维电子气不是由掺杂层中的电子转移产生的, 而是来源于材料的极化效应。AlGaN 势垒层的 Al 组分比是影响异质结特性的一个重要参数, 增大 Al 组分比可以进一步增强异质结的极化效应, 提高二维电子气的密度, 同时进一步增大异质结的导带偏移, 增强载流子的二维局域。但高的 Al 组分比也会增加异质结生长的难度, 甚至会造成界面的晶格弛豫, 同时在高 Al 组分比的势垒层上制作欧姆接触的难度也增大。本项研究采用的是在蓝宝石衬底上生长的 AlGaN/GaN 异质结, Al 组分

比为 25%, 势垒层厚为 28 nm, 材料的薄层电阻率为 $640 \Omega/\square$ 。

AlGaN/GaN HEMT 器件工艺首先要考虑的是器件的隔离, 反应离子刻蚀(RIE)、离子铣形成有源层台面以及选择离子注入都能实现器件的有效隔离。形成良好的欧姆接触是研制高性能 AlGaN/GaN HEMT 的关键^[5]。由于 GaN 和 AlGaN 很难用湿法进行腐蚀, 尽管干法工艺能解决这个问题, 但干法工艺带来的器件表面的损伤对器件的性能有严重影响, 因此 AlGaN/GaN HEMT 的材料微结构不同于 GaAs 异质结 FET 有互不影响的接触层和势垒层。在 i-AlGaN 上实现势垒接触相对较容易, 但形成良好的欧姆接触则难度较大。本文深入研究了 Ti/Al/Ni/Au 与 i-AlGaN 形成的欧姆接触。通过对该金属化结构特别是合金条件进行优化, 实现的比接触电阻达到 $4 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。采用 Ni/Au 形成 i-AlGaN 肖特基势垒接触, 该肖特基势垒的正向开启电压为 1.5 V。AlGaN/GaN HEMT 器件工艺的另一个关键技术是器件的钝化, 它不仅有助于提高器件的可靠性, 还对器件的功率特性有非常大的影响。有效钝化后的 AlGaN/GaN HEMT 的输出功率显著增大, 有的增大一倍甚至更大^[6]。钝化影响 AlGaN/GaN HEMT 的功率特性是因为 SiN 钝化介质有效地抑制了 AlGaN/GaN HEMT 的电流崩塌这一目前影响 AlGaN/GaN HEMT 实用化的主要障碍^[7]。在器件的工作过程中, 在栅漏间强电场的作用下, 电子被激发并被栅漏间的缺陷能级所俘获形成负电中心, 这些缺陷能级的充放电时间常数很大, 远赶不上射频信号的频率, 输入射频功率越大, 器件的工作电压越高, 负电中心的积累进一步增强, 栅漏间负电中心的存在使得二维电子气的密度不断降低, 器件的工作电流不断减小, 产生电流崩塌现象, 同时器件的拐点电压增大, 电压摆幅减小, 射频输出功率下降。钝化介质部分补偿了器件表面的缺陷能级, 抑制了缺陷能级对电子的俘获。有效的钝化不仅可以抑制电流崩塌现象, 而且还会提高器件的饱和电流。本文在 280℃下进行了 SiN 介质的生长, 钝化后器件的饱和漏电流增加约 10%。钝化介质的引入改变了表面缺陷能级对电子的俘获, 相应费米能级的位置也发生变化, 引起二维电子气密度的增加。

3 AlGaN/GaN HEMT 的直流特性

研制的 200 μm 栅宽 T 型布局 AlGaN/GaN

HEMT, 单指栅宽为 $100\mu\text{m}$, 源漏间距为 $3\mu\text{m}$, 栅长为 $0.8\mu\text{m}$. 图 2 给出了器件的转移特性, 器件的饱和漏电流 I_{ds} 为 660mA/mm , 栅偏置 $V_{\text{gs}}= + 2\text{V}$ 时的 I_{max} 为 750mA/mm , 最大跨导约为 160mS/mm , 夹断电压为 $- 5.5\text{V}$, 器件的栅漏击穿电压 $\text{BV}_{\text{gd}} > 70\text{V}$. AlGaN/GaN HEMT 优异的功率特性正是源于该

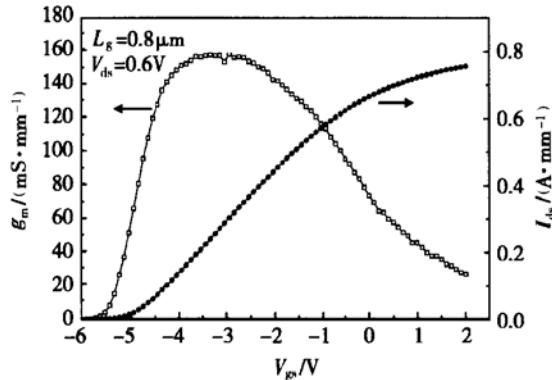


图 2 AlGaN/GaN HEMT 的 I_{ds} 和 g_m 随 V_{gs} 的变化

Fig. 2 I_{ds} and g_m of AlGaN/GaN HEMT versus V_{gs}

器件有较大的单位毫米栅宽的工作电流, 能够承受更高的工作电压. 提高器件的输出功率密度, 除了能改善器件的散热之外, 重点还在于通过材料结构的优化, 提高肖特基势垒高度, 提高器件的击穿电压以及提高二维电子气密度及其迁移率, 使得器件具有尽可能大的单位毫米栅宽饱和电流和能够承受尽可能高的工作电压. 目前这方面的研究十分活跃, 如采用掺杂势垒提高二维电子气的密度^[3, 8], 采用 GaN 帽层提高势垒高度^[1, 8]等.

4 AlGaN/GaN HEMT 的频率特性和功率特性

在片测试器件在不同频率下的 S 参数, 可由得到的 S 参数推导出器件的短路电流增益 H_{21} 和单向最大可用功率增益 MAG 随频率的变化. 图 3 给出了 AlGaN/GaN HEMT 在 $V_{\text{ds}}= 10\text{V}$, $V_{\text{gs}}= - 3\text{V}$ 时的测试结果, 可以看出栅长为 $0.8\mu\text{m}$ 的该器件其电流增益截止频率 f_T 约为 20GHz , 最大振荡频率 f_{max} 约为 40GHz , 这一结果与同样栅长的 GaAs MESFET 的频率特性接近.

采用负载牵引进行了 AlGaN/GaN HEMT 的微波功率特性的测试. 图 4 给出了该器件在 1.8GHz , $V_{\text{ds}}= 30\text{V}$ 时的输出功率 P_{out} 、功率增益 G_p

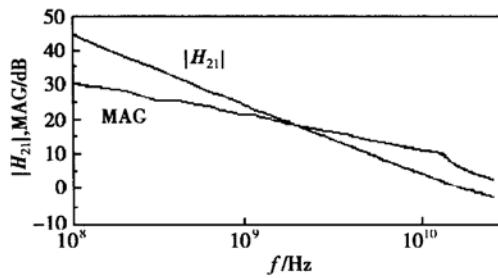


图 3 AlGaN/GaN HEMT 的 $|H_{21}|$ 和 MAG 随频率的变化

Fig. 3 $|H_{21}|$ and MAG of AlGaN/GaN HEMT versus frequency

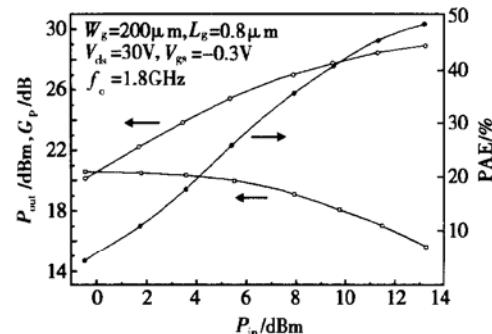


图 4 AlGaN/GaN HEMT 的 P_{out} 和 G_p 、PAE 随 P_{in} 的变化

Fig. 4 P_{out} , G_p and PAE of AlGaN/GaN HEMT as a function of P_{in}

和功率附加效率 PAE 随输入功率 P_{in} 的变化. 当 P_{in} 为 13.34dBm 时, 输出功率为 28.93dBm , 输出功率密度达到 3.9W/mm , 功率增益为 15.59dB , 功率附加效率为 48.3% . 图 5 给出了该器件在 1.8GHz , 当 $P_{\text{in}}= 13.34\text{dBm}$ 时的输出功率和功率附加效率随漏

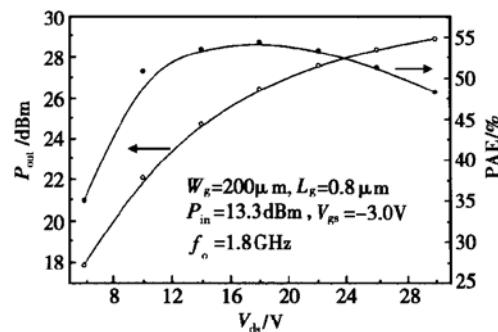


图 5 AlGaN/GaN HEMT 的 P_{out} 和 PAE 随 V_{ds} 的变化

Fig. 5 P_{out} and PAE of AlGaN/GaN HEMT as a function of V_{ds}

电压的变化. 可以看出当 V_{ds} 在大于 10V 的较大工作范围内, 器件都表现出较高的功率附加效率, 最大

的功率附加效率大于 54%。测试了该器件在 6.2GHz 时的微波功率特性, 当 $V_{ds} = 25V$, $P_{in} = 16.81dBm$ 时该器件输出功率为 27.06dBm, 输出功率密度为 2.5W/mm, 功率增益为 10.24dB, PAE 为 35.2%。

5 结果及讨论

研制的蓝宝石衬底上非掺杂的 AlGaN/GaN HEMT, 在器件工艺中采用了 Ti/Al/Ni/Au 欧姆接触金属化, 达到的比接触电阻为 $4 \times 10^{-6} \Omega \cdot cm^2$, 0.8μm 栅长、200μm 栅宽的 AlGaN/GaN HEMT 其小信号特性与同样栅长的 GaAs MESFET 的结果接近, 减小栅长可进一步提高该器件的频率特性。这一结果充分反应出 AlGaN/GaN HEMT 在频率上的优势。该器件在 1.8GHz 时的输出功率密度达到 3.9W/mm, 尽管由于蓝宝石的散热性能较差, 限制了器件输出功率的进一步增大, 但这已充分反应出 AlGaN/GaN HEMT 作为新一代的微波功率器件在性能上的优势。在 6.2GHz 下该器件的输出功率密度为 2.5W/mm, 与 1.8GHz 的结果有较大差距, 源引线电感太大, 器件的功率附加效率太低是一个重要原因。另外通过比较该器件在两个频率下工作时的热耗散, 可以看出 6.2GHz 下的热耗散比 1.8GHz 下的大, 相应 6.2GHz 下的工作结温比 1.8GHz 下的高。随着温度的不断升高, 势垒特性将不断恶化, 这也是影响器件微波性能的一个重要方面。本文是目前国内研制出的具有微波功率特性的

AlGaN/GaN 微波功率 HEMT 的首次报道。优化器件的材料结构和器件工艺, 优化器件的装配工艺, 改善器件的散热将进一步提高器件的微波性能。

致谢 南京电子器件研究所 GaAs 工艺加工部和 GaAs MMIC 设计部参加了本项研究工作, 在此表示感谢。

参考文献

- [1] Eastman L F, Tilak V, Green B, et al. Undoped AlGaN/GaN HEMTs for microwave power amplifier. *IEEE Trans Electron Devices*, 2001, 48(3): 479
- [2] Tilak V, Green B, Kaper V, et al. Influence of barrier thickness on the high power performance of AlGaN/GaN HEMTs. *IEEE Electron Device Lett*, 2001, 22(11): 504
- [3] Wu Y F, Kapolnek D, Ibbetson J P, et al. Very-high power density AlGaN/GaN HEMTs. *IEEE Trans Electron Devices*, 2001, 48(3): 586
- [4] Wu Y F, Chavarkar P M, More M, et al. A 50W AlGaN/GaN HEMT amplifier. *Proc IEEE Int Electron Devices Meeting*, 2000: 375
- [5] Fan Z, Mohammand S N, Kim W, et al. Very-low resistance Ohmic contact to n-GaN. *Appl Phys Lett*, 1996, 68(12): 1672
- [6] Leier H, Wieszt A, Behtash R, et al. RF power performance of passivated AlGaN/GaN HFETs grown on SiC and sapphire. *The 9th European GaAs and Other Semiconductor Application Symposium*, 2001: 49
- [7] Vetary R, Zhang N Q, Keller S, et al. The impact of surface states on the DC and RF characteristics of AlGaN/GaN HEMT. *2002 IEEE MTT-S Digest*, 2002: 1815
- [8] Kikkawa T, Nagahara M, Kimura T, et al. A 36W CW AlGaN/GaN HEMT using surface-charge-controlled structure. *IEEE Trans Electron Devices*, 2001, 48(3): 560

Undoped AlGaN/GaN Microwave Power HEMT

Chen Tangsheng, Jiao Gang, Xue Fangshi, Cao Chunhai and Li Fuxiao

(Nanjing Electronic Devices Institute, Nanjing 210016, China)

Abstract: The developed AlGaN/GaN microwave power HEMT is reported. Undoped AlGaN/GaN heterostructure grown on sapphire substrates is used to fabricate the devices. Ti/Al/Ni/Au Ohmic contact and Ni/Au Schottky barrier contact are used in the processing of the device. AlGaN/GaN HEMT with 200μm gate width and with T-shaped layout delivers 28.93dBm output power with 15.59dB power gain and 48.3% power-added efficiency(PAE) at frequency of 1.8GHz and $V_{ds} = 30V$. The output power density reaches 3.9W/mm. The device demonstrates an output power of 27.06dBm with 10.24dB power gain and 35.2% PAE at frequency of 6.2GHz and $V_{ds} = 25V$.

Key words: wide bandgap semiconductor; AlGaN/GaN; high electron mobility transistor ; microwave high power
EEACC: 1850F; 1220

Article ID: 0253-4177(2004)01-0069-04