

变温 $C-V$ 和传输线模型测量研究 AlGaIn/GaN HEMT 温度特性*

王 冲[†] 张金凤 杨 燕 郝 跃 冯 倩 张进城

(西安电子科技大学微电子研究所 宽禁带半导体材料与器件教育部重点实验室, 西安 710071)

摘要: 通过对异质结材料上制作的肖特基结构变温 $C-V$ 测量和传输线模型变温测量, 研究了蓝宝石衬底 AlGaIn/GaN 异质结高电子迁移率晶体管的直流特性在 25 ~ 200 K 之间的变化, 分析了载流子浓度分布、沟道方块电阻、欧姆比接触电阻和缓冲层泄漏电流随温度的变化规律. 得出了器件饱和电流随温度升高而下降主要由输运特性退化造成, 沟道泄漏电流随温度的变化主要由栅泄漏电流引起的结论. 同时, 证明了 GaN 缓冲层漏电不是导致器件退化的主要原因.

关键词: 高电子迁移率晶体管; 二维电子气; 传输线模型; 泄漏电流

EEACC: 2520D; 2530C

中图分类号: TN325⁺. 3

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)05-0864-05

1 引言

基于 AlGaIn/GaN 异质结的 HEMT 在高温器件及大功率微波器件方面有非常好的应用前景^[1]. 在 AlGaIn/GaN 异质结材料特性和器件关键工艺的技术水平逐渐提高后, 器件特性大幅度提高^[2]. AlGaIn/GaN HEMT 的优势之一就是能在高温环境中应用, 因此, 对于器件特性随温度的变化规律及其机理的研究十分必要. 国际上对 AlGaIn/GaN HEMT 温度特性已有报道, 但对于栅泄漏电流随温度的变化规律和机理的解释各有不同^[3~6]. 本文对自行研制的蓝宝石衬底 AlGaIn/GaN HEMT 在提升的温度下直流特性的下降及栅泄漏电流变化规律进行了分析, 并用变温 $C-V$ 及传输线模型 (TLM) 测量研究了器件特性随温度变化的机理.

2 器件制作和测量

采用 MOCVD 方法在蓝宝石衬底基片 (0001) 面上外延生长了 AlGaIn/GaN 异质结. 蓝宝石衬底厚度为 330 μm , 材料层结构由下而上依次为: 850nm 未掺杂 GaN 外延层; 5nm 未掺杂 AlGaIn 隔离层; 12nm Si 掺杂 AlGaIn 层 (Si 掺杂浓度 $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$); 6nm 未掺杂 AlGaIn 帽层. PL 谱测量后计算

得到的 AlGaIn 层 Al 组分为 27%. Hall 效应测量显示, 室温下蓝宝石衬底上生长的材料的二维电子气 (2DEG) 迁移率和面密度分别为 $1028 \text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 和 $1.6 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$.

器件台面隔离采用 ICP 干法刻蚀, 刻蚀深度为 150nm; 源漏欧姆接触采用 Ti/Al/Ni/Au (30nm/180nm/40nm/60nm) 830 $^\circ\text{C}$ N_2 气中退火, 栅金属采用 Ni/Au (30nm/200nm). 制备的 AlGaIn/GaN HEMT 栅长为 1 μm ; 栅宽为 50 μm ; 源漏间距为 4 μm , 栅处于源漏间正中央. 肖特基 $C-V$ 测试结构内外环直径分别为 120 μm 和 200 μm , TLM 结构宽度为 100 μm , 两测试结构都与 HEMT 在同一片材料上制作, 并规则地分布于器件周围. 使用 HP4156B 精密半导体参数测试仪和 HP8720D 网络分析仪测试了器件直流和高频特性, 采用 Westbond-K1200D 热板对器件进行加温, $C-V$ 测试采用 Keithley 590 $C-V$ 分析仪进行. 器件在栅压 1V 下最大饱和电流为 953 mA/mm; 在源漏偏置为 6V 时最大跨导为 251 mS/mm; 在源漏偏置 8V、栅偏置 -0.5V 时截止频率 (f_T) 为 10.6 GHz, 表明器件具有良好的性能.

3 测量结果及分析

对 AlGaIn/GaN HEMT 的直流特性进行了温度由 25 至 200 K 的测试. 器件最大饱和电流和最

*国防 973 计划项目 (批准号: 513270407), 国防科技预研基金 (批准号: 41308060106), 国防科技重点实验室基金 (批准号: 51433040105DZ0102) 和国家重点基础研究发展规划 (批准号: 2002CB3119) 资助项目

[†]通信作者. Email: wangchong197810@hotmail.com

2005-12-27 收到, 2006-01-24 定稿

大跨导都随温度的升高而下降,在 200 器件栅压 1V 下最大饱和电流下降了 39%,源漏偏置 6V 时的最大跨导下降了 40%,如图 1 所示. Arulkumaran 等人^[4]报道了蓝宝石衬底 AlGaIn/GaN HEMT 在升高的温度下直流特性的下降,我们的器件与之相比最大饱和电流退化稍大,跨导退化程度近似. 器件栅泄漏电流是在源漏偏置为 40V,栅偏置为 -6V 下测量得到,栅泄漏电流在温度由 25 到 150 变化过程中逐渐减小,高于 150 后栅泄漏电流逐渐增大,如图 2 所示. Arulkumaran 等人^[5]报道的栅泄漏电流随温度的变化规律也是先下降后上升,但拐点温度为 80 左右,而我们的器件在 150 . 不同的肖特基漏电机制造使漏电流随温度变化规律不同,比如碰撞电离机制使栅漏电流有负的温度系数,而隧穿机制则是正温度系数,还有表面空穴导电等机理^[6],对这些机理的研究还有待深入. 器件阈值电压由 V_{ds} 偏置为 0.1V 时的 I_d-V_g 关系曲线中提取得出,随温度增加阈值电压有微小的负方向移动.

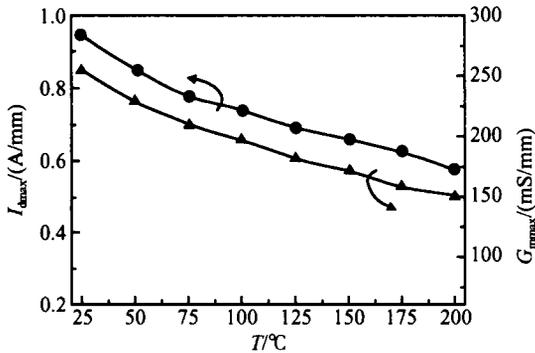


图 1 最大饱和电流和最大跨导随温度变化关系
Fig. 1 I_{dmax} and G_{mmax} as a function of temperature

图 3 和图 4 分别是器件输出特性和转移特性在 25 和 200 的对比. 从图 3 可以看出,200 时饱和电流下降明显,饱和电压变化不大. 图 4 中电流转移特性用半对数坐标表示,这样能更好地对比出器件在栅夹断后的沟道泄漏电流. 器件在 200 时沟道泄漏电流增大了两倍多. 图 4 中 200 时跨导明显下降,跨导最大值处的栅压值向正方向移动.

在 GaN 基 HEMT 中,导电沟道位于 AlGaIn/GaN 异质界面处,主要的导电由 2DEG 提供. 在器件电流达到饱和时,源漏饱和电流可表示为^[7]:

$$I_{Dsat} = \frac{qW_D\mu_n}{L} \int_{V_{th}}^{V_g} n_{2D}(u) du \quad (1)$$

式中 W_D 为栅宽; L 为栅长; μ_n 为迁移率; n_{2D} 为二维电子气密度; V_g 为栅压; V_{th} 为阈值电压. 在器件结构确定后,饱和电流主要受迁移率和 2DEG 密度

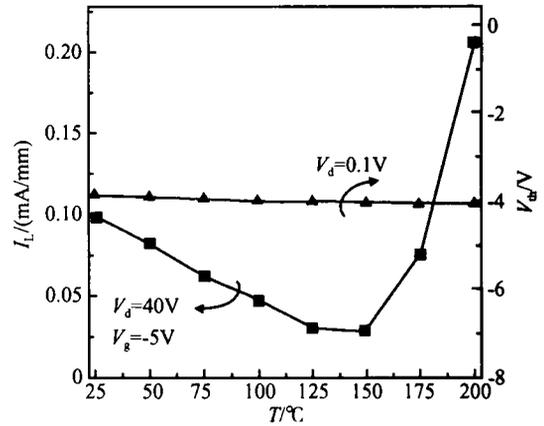


图 2 栅泄漏电流和阈值电压随温度变化关系
Fig. 2 I_L and V_{th} as a function of temperature

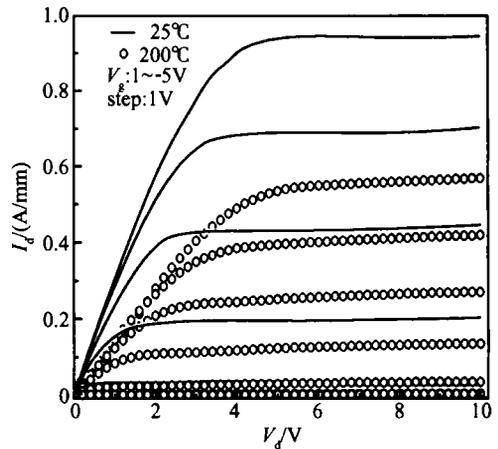


图 3 25 和 200 的输出特性对比
Fig. 3 Output characteristics at 25 and 200

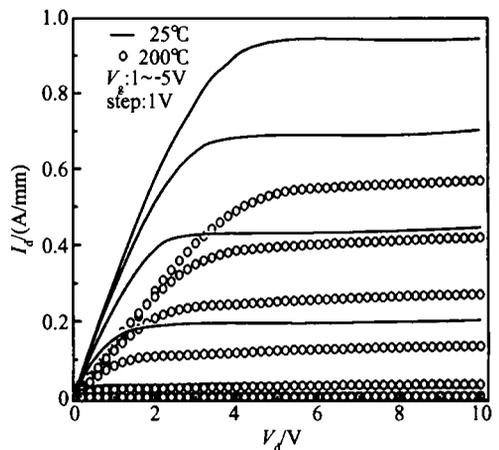


图 4 25 和 200 的转移特性对比
Fig. 4 Transfer characteristics at 25 and 200

的影响. 当温度在 25 ~ 200 范围内升高时由于电子输运中受到的散射作用增强^[8],迁移率随温度的变化近似为: $\mu \propto T^{-3/2}$,迁移率随温度升高会明显下

降.

我们还采用了变温肖特基 $C-V$ 测量及 TLM 测量研究 AlGaIn/GaN HEMT 器件特性随温度升高而退化的机理. 变温肖特基 $C-V$ 测试结果能很好地反应出载流子浓度的分布随温度的变化. 在 AlGaIn/GaN 的电子体系中, 2DEG 占主导地位, 体电子只占很小的一部分, 尤其是沟道处. 所以测得的 $C-V$ 载流子分布可以近似地反映 2DEG 的分布. 变温 TLM 测量能得到沟道方块电阻与接触电阻随温度的变化, 能更深入地分析器件特性随温度下降的主要原因. 这两种测试结构与器件在同一片材料上制作, 并规则地分布于器件周围, 这保证了测试结构与器件随温度变化的一致性并减小了材料的不均匀性所造成的影响.

图 5 所示为肖特基 $C-V$ 测量得到的不同温度下电容与电压的关系曲线. 随着温度的上升在偏压大于 0V 的区域即肖特基正偏时, 电容曲线最大值明显上升, 这是由于 Si-AlGaIn 层中的电子浓度随

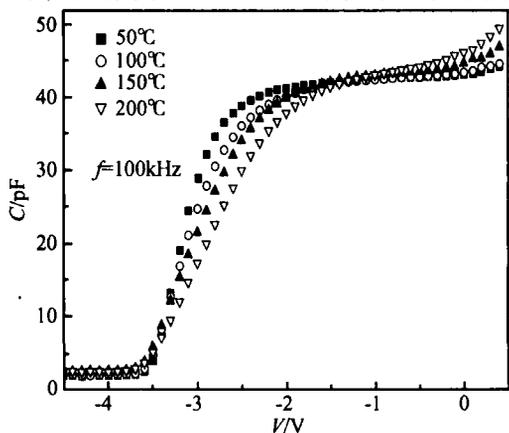


图 5 电容随偏压变化曲线在不同温度下的对比

Fig. 5 Schottky $C-V$ characteristics at different temperatures

温度增大造成的. 当偏压在 -3 ~ -2V 之间, 电容曲线的斜率随温度的升高而变小, 这说明 2DEG 向 GaN 侧的分布尾展宽. 由 $C-V$ 曲线可以求出不同深度的载流子浓度^[9]:

$$N_{cv} = - \frac{1}{q \epsilon_0 \epsilon_{AlGaIn} A^2} \times \frac{1}{dV} \frac{dC}{dV} \quad (2)$$

式中 N_{cv} 为 $C-V$ 载流子浓度; A 为肖特基接触面积; q 为电子电量, ϵ_0 和 ϵ_{AlGaIn} 分别为空气和 AlGaIn 的介电常数. 计算得到的不同温度下载流子浓度分布如图 6 所示, 图中 x 轴表示离开 AlGaIn 表面的距离, 在峰值 23nm 附近的电子浓度随温度增大而减小; 而在小于 20nm 处的电子浓度随温度增大而增大; 在大于 40nm 后电子浓度随温度的增大而增大. 通过对不同温度下的载流子峰积分得到 2DEG

的面密度, 对比发现电子面密度未有明显变化. 但电子的分布向沟道两侧扩展, 三维的性质增强了, 2DEG 分布的陡峭程度下降. 当 2DEG 的二维特性减弱而三维特性增强, 电子在运输中受到的散射作用也会增大, 引起电子迁移率的进一步下降.

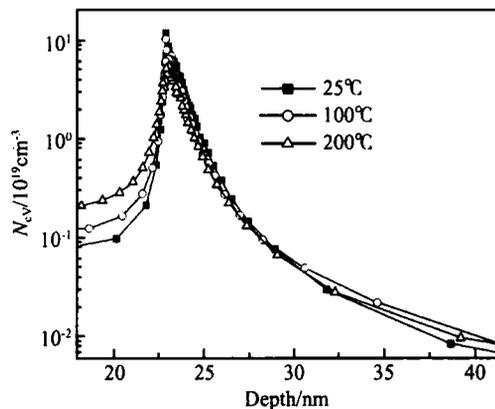


图 6 不同温度下载流子浓度分布的变化

Fig. 6 N_{cv} distributions at different temperatures

图 7 为变温 TLM 测试后计算得到的材料方块电阻和比接触电阻随温度的变化规律. 材料方块电阻随温度的上升近似线性增大, 而比接触电阻几乎未发生变化. 这说明温度上升造成的器件直流特性退化主要是方块电阻增大所引起的, 在 25 时方块电阻为 380 Ω/\square , 而 200 时增大到 1050 Ω/\square .

$$R_{sh} = \frac{1}{\mu_n N_s q} = \frac{1}{\mu_n q \int n_{2D}(z) dz} \quad (3)$$

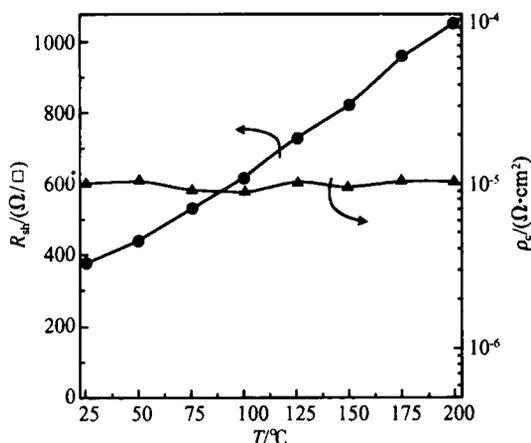


图 7 沟道方块电阻和比接触电阻随温度的变化

Fig. 7 Sheet resistance and specific contact resistance as a function of temperature

由公式 (3) 可以看出, 材料方块电阻受迁移率和 2DEG 面密度影响, 由变温 Hall 测量^[10]和变温 $C-V$ 测试结果计算得到的 2DEG 面密度随温度变化不大, 考虑到温度变化引起的平行电导的影响, 我们可

以近似地认为 2DEG 密度不变,故采用室温测量得到的 2DEG 面密度及随温度变化的方块电阻值可以大致估算出迁移率随温度的变化关系.由测量得到的材料方块电阻随温度的增大曲线计算得到了迁移率随温度的下降的近似规律,迁移率由 25 时的 $1028\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 在 100 下降为 $635\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$,在 200 下降为 $372\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$,这与采用变温 Hall 效应测量的迁移率随温度升高而下降的研究结果^[10]很相近.所以迁移率下降是方块电阻增大的主要原因,也是饱和电流随温度升高而下降的主要原因.

图 4 中器件在 200 时沟道泄漏电流增大了两倍多,异质结材料 GaN 缓冲层中的漏电随温度升高以及栅泄漏电流随温度的增大都可能引起沟道泄漏电流增大.在肖特基 $C-V$ 结构测试中 -6V 偏置下 2DEG 被耗尽,这时测得的电容值随温度的变化能反映 GaN 缓冲层中的本底载流子浓度随温度的变化.从图 8 可以看出,温度逐渐升高时电容有微小上升.图 8 中的 I_L 表示相邻有源区台面之间加 10V 电压时的泄漏电流,它随温度的上升逐渐增大,但在 200 时的泄漏电流也仅为 0.26nA.同时对比图 2 的栅泄漏电流和图 4 的沟道泄漏电流的量级,可以认为沟道夹断后的泄漏电流在 200 时增大了两倍多是由栅泄漏电流增大而引起的.对不同温度下的栅泄漏电流和沟道泄漏电流进行对比,发现沟道泄漏电流随温度的变化规律与栅泄漏电流随温度的变化规律一致.

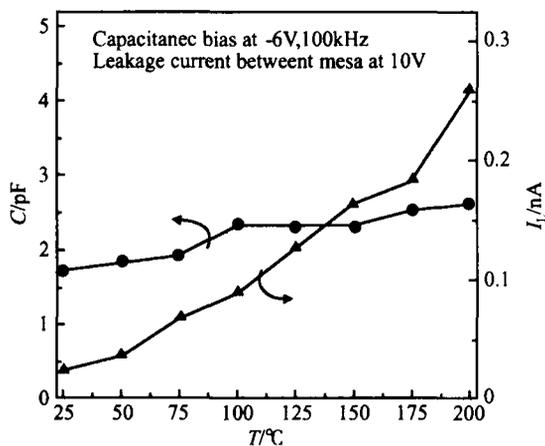


图 8 缓冲层电容和缓冲层漏电随温度的变化

Fig. 8 Buffer capacitance and mesa leakage as a function of temperature

4 结论

对蓝宝石衬底 AlGa_xN/GaN HEMT 在较高温度下直流特性的下降及栅泄漏电流变化规律进行了

分析.器件饱和电流和跨导都随温度的升高而下降,在 200 时器件最大饱和电流下降了 39%,最大跨导下降了 40%.器件栅泄漏电流由室温到 150 变化过程中逐渐减小,高于 150 后栅泄漏电流逐渐增大,阈值电压随温度增加有微小的负方向移动.变温肖特基 $C-V$ 测量表明,2DEG 分布随温度上升向两侧扩展,三维的性质增强,电子分布的陡峭程度下降,这使得沟道迁移率进一步下降.变温 TLM 测量表明器件欧姆接触电阻在升高温度时未发生退化,而材料方块电阻随温度升高近似线性的增大,计算得到迁移率的下降规律与已报导的变温霍尔测量结果较为相近.饱和电流随温度升高而下降主要是由输运特性退化造成的,沟道泄漏电流随温度的变化主要由栅泄漏电流引起,GaN 缓冲层漏电的作用是次要的.

参考文献

- [1] Trew R J, Shin M W, Gatto V. High power application for GaN-based device. *Solid State Electron*, 1997, 41(10): 1561
- [2] Wang Xiaoliang, Liu Xinyu, Hu Guoxin, et al. X-band GaN power HEMTs with power density of 2.23W/mm. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2005, 26(10): 1866 (in Chinese) [王晓亮,刘新宇,胡国新,等.输出功率密度为 2.23W/mm 的 X 波段 AlGa_xN/GaN 功率 HEMT 器件. *半导体学报*, 2005, 26(10): 1866]
- [3] Ahmed M M, Ahmed H, Ladbroke P H, et al. Effects of interface states on submicron GaAs MESFET assessed by gate leakage current. *J Vac Sci Technol B*, 1995, 13(4): 1519
- [4] Arulkumaran S, Egawa T, Ishikawa H, et al. High temperature effects of AlGa_xN/GaN high electron mobility transistors on sapphire and seminsulating SiC substrates. *Appl Phys Lett*, 2002, 80(12): 2186
- [5] Arulkumaran S, Egawa T, Ishikawa H, et al. Temperature dependence of gate-leakage current in AlGa_xN/GaN high electron mobility transistors. *Appl Phys Lett*, 2003, 80(17): 3207
- [6] Tan W S, Houston P A, Parbrook P J, et al. Gate leakage effects and breakdown voltage in metalorganic vapor phase epitaxy AlGa_xN/GaN heterostructure field-effect transistors. *Appl Phys Lett*, 2002, 80(17): 3207
- [7] Stengel F, Mohammad S N, Morkoc H. Theoretical investigation of electrical characteristics of AlGa_xN/GaN modulation doped field-effect transistors. *J Appl Phys*, 1996, 80(5): 3031
- [8] Gokden S, Baran R, Balkan N, et al. The effect of interface roughness scattering on low field mobility of 2D electron gas in GaN/AlGa_xN heterostructure. *Physica E*, 2004, 24: 249
- [9] Zhou Yugang, Shen Bo, Liu Jie, et al. Investigation on two-dimensional electron gas in Al_xGa_{1-x}N/GaN heterostructure by using Schottky $C-V$ measurement. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2001, 22(11): 1420 (in Chinese) [周玉刚,沈波,刘杰,等.肖特基 $C-V$ 法研究 Al_xGa_{1-x}N/GaN 异质结界面二维电子气. *半导体学报*, 2001, 22(11): 1420]
- [10] Wang Xiaoliang, Wang Cuimei, Hu Guoxin, et al. RF-MBE grown AlGa_xN/GaN HEMT structure with high Al content. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2005, 26(6): 1116 (in Chinese)

nese) [王晓亮,王翠梅,胡国新,等. RF-MBE 生长的高 Al 势
垒层 AlGaIn/GaN HEMT 结构. 半导体学报, 2005, 26(6):

1116]

Temperature Characteristics of AlGaIn/GaN HEMTs Using C-V and TLM for Evaluating Temperatures^{*}

Wang Chong[†], Zhang Jinfeng, Yang Yan, Hao Yue, Feng Qian, and Zhang Jincheng

(Key Laboratory of the Ministry of Education for Wide Band Gap Semiconductor Materials and Devices,
Microelectronics Institute, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: The DC characteristics of AlGaIn/GaN HEMTs are measured in a temperature range from 25 to 200 . On the same wafer, Schottky C-V and transmission line model measurements are carried out at different temperatures. The temperature dependence of the distribution of the two-dimensional electron gas, the sheet resistance, the ohmic specific contact resistance, and the buffer leakage current are analyzed. We conclude that the reduced saturation current is mainly due to the degradation of the electron transport property. The channel leakage current arises from the gate leakage current, and the leakage of the GaN buffer layer plays a secondary role.

Key words: high electron mobility transistors; 2DEG; TLM; leakage current

EEACC: 2520D; 2530C

Article ID: 0253-4177(2006)05-0864-05

^{*}Project supported by the Technical Pre-Research Program of China (No. 513270407), the National Defence Pre-Research Foundation of China (No. 51308060106), the Key Laboratory Fund of National Defence of China (No. 51433040105D Z0102), and the State Key Development Program for Basic Research of China (No. 2002CB3119)

[†]Corresponding author. Email: wangchong197810@hotmail.com

Received 27 December 2005, revised manuscript received 24 January 2006

©2006 Chinese Institute of Electronics