

界面态对 AlGaAs/GaAs HEMT 直流输出特性的影响

张兴宏 程知群 夏冠群 徐元森

(中国科学院上海冶金研究所 上海 200050)

杨玉芬 王占国

(中国科学院半导体研究所半导体材料科学实验室 北京 100083)

摘要 本文利用高电子迁移率晶体管(HEMT)的直流输出分析模型,首次定量地分析了界面态对 AlGaAs/GaAs HEMT 直流输出特性的影响。考虑界面态的作用,详细分析了不同界面态密度对 HEMT 的 $I-V$ 特性和器件跨导的影响。我们的研究表明随着界面态密度的增加,栅极电压对电流的控制能力减小,从而使器件的跨导减小。

EEACC: 2560S, 2560B

1 引言

虽然有许多文献报道了 AlGaAs/GaAs, AlGaAs/InGaAs 和 InAlAs/InGaAs 异质结中界面态的存在^[1~4],而且用各种不同的方法间接测量了界面态的大小、俘获截面以及其深度和分布。也有许多作者对 HEMT 的直流输出特性中观察到的诸如弯曲效应、光电导等物理现象作了不少的探讨^[5,6]。这些现象与界面态、DX 中心、杂质缺陷等因素有关。然而对于异质结中界面态对 HEMT 器件性能的影响有多大,以及定量分析始终是个难题。特别是近年来,世界上许多科学家都非常感兴趣的 InAlAs/InGaAs/InP HEMT 中的 InAlAs/InGaAs 异质界面发现有更大的界面态^[4]。尽管有作者研究了 AlGaAs/GaAs 异质结界面态对二维电子的作用^[7],但还是没有人定量地研究界面态对 HEMT 器件性能的影响,然而这个问题对器件来说是很重要的。

如果在异质结中存在较大的界面态,将对器件沟道的二维电子气有明显的影 响。在我们以前的工作已经详细分析了不同界面态密度对 HEMT 沟道电子和电场的作 用^[8,9]。所以,界面态对沟道电子的影响也一定表现在器件的直流输出特性中。在这篇文章中我们利用 Wang 和 Ku 建立的 HEMT 直流特性分析计算机辅助模型^[10],然后考虑界面态的因素,对原有的模型进行了修正。在此基础上计算得到了 AlGaAs/GaAs HEMT 有界面态存在时的

张兴宏 男,1966 年出生,博士后,目前主要从事 III-V 族化合物半导体材料物理与器件物理研究

夏冠群 男,1941 年出生,博士生导师,研究员,长期从事 GaAs 半导体器件及电路研究

1998-07-09 收到,1998-09-11 定稿

I - V 特性和 HEM T 器件跨导,并详细分析了界面态对 HEM T 跨导的影响

2 器件的物理模型

假设在 HEM T 中掺杂的 AlGaAs 层全部耗尽,仅有二维电子气(2DEG)的贡献导电,那么二维电子密度 N_s 与栅压 V_G 的关系为:

$$N_s(V_G) = \frac{\epsilon_0}{q(d_d + d_i + \Delta d)} (V_G - V_{th}) \quad (1a)$$

$$V_{th} = \phi_{bn} - (\Delta E_c - E_F)/q - V_p + \Delta E_{F0} \quad (1b)$$

$$V_p = qN_{DA}d_d^2/2\epsilon_0 \quad (1c)$$

其中 V_{th} 是阈值电压; ϵ_0 是 AlGaAs 的介电常数; d_d 为掺杂层 AlGaAs 的厚度; d_i 为空间层 AlGaAs 的厚度; Δd 为导电沟道的有效宽度; ϕ_{bn} 是肖特基势垒高度; ΔE_c 为异质结的导带不连续; E_F 为费米能级; N_{DA} 为施主浓度 ΔE_{F0} 是与温度有关的常数, ΔE_{F0} 在 300K 时为 0V, 在 77K 以下为 0.025V^[11]. 根据 Wang 和 Ku 建立的 HEM T 直流特性分析模型^[10], 电流-电压特性为:

(I) 线性区 ($V_D < V_{sat}$, V_{sat} 是饱和电压), 2DEG 沟道电流 I_D 是栅压和漏电压 V_D 的函数:

$$I_D = A (V_G - V_{th} - V_D/2) \frac{V_D}{(1 + V_D/B)} \quad (2a)$$

$$A = Z\mu_B\epsilon_0/L (d_d + d_i), B = 2L v_s/\mu_B \quad (2b)$$

其中 μ_B 是 GaAs 中的低场电子迁移率, v_s 为电子饱和速度, Z 和 L 分别为沟道的宽度和长度

(II) 饱和区 ($V_D > V_{sat}$), 即当电场很大时, 电子速度达到饱和, 这时漏电流为:

$$I_D = \frac{A (V_G - V_{th} - V_{sat}/2)V_{sat}}{1 - K_1 + V_{sat}/B} \quad (3a)$$

$$V_{sat} = \frac{(1 - K_1)B (V_G - V_{th})}{(1 - K_1)B + (V_G - V_{th})} \quad (3b)$$

$$K_1 = \frac{(B + V_D + V_G - V_{th}) + CO}{\frac{1}{2}\alpha^2 A (V_G - V_{th})^2 - 2B} \quad (3c)$$

$$CO = \{ (B + V_D + V_G - V_{th})^2 + [\alpha^2 A (V_G - V_{th})^2 - 4B] \times [(1 + (V_G - V_{th})/B)] V_D \}^{1/2} \quad (3d)$$

$$\alpha = 1/(\epsilon_0 v_s \Delta d). \quad (3e)$$

因为界面态表现为电容效应, 随着栅压的变化界面态上的电子填充情况也会发生变化, 从而影响到沟道中的电子浓度. 所以, 当有界面态存在时上面各式中的阈值电压可表示为:

$$V_{th} = \phi_{bn} - \frac{\Delta E_c}{q} - V_p - \frac{Q_{int}}{C_0} + \frac{E_F}{q} + \Delta E_{F0} \quad (1b')$$

Q_{int} 是单位面积的界面电荷, 我们考虑 $Q_{int} = qn_{s0}(1 - \beta V_G)$, 其中 β 为系数, $0 < \beta < 1$, 大小与界面态的俘获截面和浓度有关, n_{s0} 是固定界面态密度. 本文定量计算不同界面态密度时 AlGaAs/GaAs HEM T 的直流输出电流. 根据直流的 I - V 输出可计算得到器件的跨导, 即跨导

$g_m = \left. \frac{\partial I_{ds}}{\partial V_g} \right|_{V_D = \text{const}}$. HEMT 计算模型所使用的参数在表 1 中列出

表 1 HEMT 计算模型所使用的参数

ϵ/ϵ_0	$\mu_B/(\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	Z/cm	L/cm	d_a/nm	d_i/nm
12.9	8500	5.0×10^{-3}	1.0×10^{-4}	40	3
$\Delta d/\text{nm}$	Φ_{B0}/V	$\Delta E_c/\text{eV}$	N_{DA}/cm^{-3}	$V_{sat}/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	
8	0.8	0.32	1×10^{18}	2.0×10^7	

3 结果与讨论

图 1 给出了 AlGaAs/GaAs HEMT 不同界面态密度时的直流输出, 其界面态密度分别

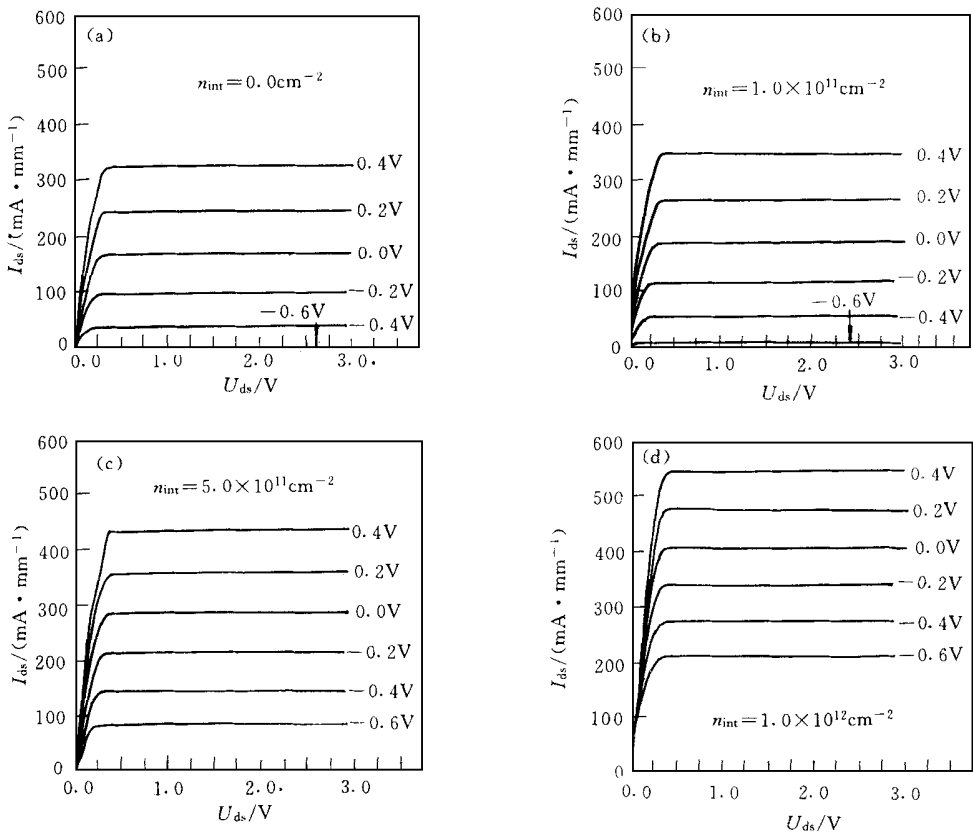


图 1 AlGaAs/GaAs HEMT 不同界面态密度的直流 $I-V$ 输出

纵轴为源漏电流 I_{ds} , 横轴为源漏电压 U_{ds}

为 (a) 0cm^{-2} , (b) $1 \times 10^{11}\text{cm}^{-2}$, (c) $5 \times 10^{11}\text{cm}^{-2}$, (d) $1 \times 10^{12}\text{cm}^{-2}$. 图 1(a) 为无界面态存在时的直流输出, 计算结果表明没有界面态存在时直流输出有良好的夹断特性和饱和特性, 当在栅压为 -0.6V 时器件沟道电子被夹断. 在图 1(b) 中当界面态密度为 $1 \times 10^{11}\text{cm}^{-2}$ 时, 其直

流输出与没有界面态时的情况变化不大,只是输出电流稍微增加。当界面态密度为 $5.0 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$ 时(如图 1(c)),直流输出电流明显增加,而且在栅压为 -0.6V 时还有较大的电流输出,并不出现夹断现象。界面态密度进一步增大时,直流输出电流变得更大,在 -0.6V 的栅压下还有较大的输出电流。这是因为界面态密度增加时,在源漏间的电场的作用下界面态上的电子发生电离并参与沟道导电,所以,电流 I_{ds} 增大。同时还可以发现随界面态密度的增加,在相同栅压间隔的情况下,在饱和区低栅压时直流输出的 ΔI_{ds} 变大,而在高栅压时直流输出的 ΔI_{ds} 变小,这就说明随着界面态密度的变化,器件的跨导也将发生变化。

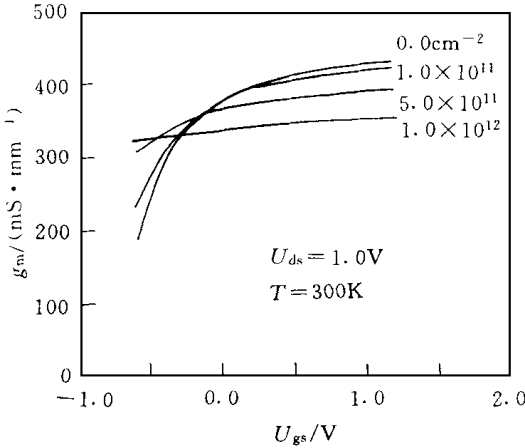


图 2 HEMT 中不同界面态密度时跨导随栅压的变化

图 2 给出了相应与图 1 直流输出的不同界面态密度在 300K 温度时跨导随栅压的变化关系,图 2 中计算时取漏电压为 1.0V (在饱和区)。从图中的计算结果表明,当界面态密度较小时 ($1.0 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$) 或没有界面态时器件的跨导随栅压有较大的变化,当栅压较小时,器件的跨导较小,而且跨导随栅压变化较大,随着栅压的增大,跨导增加缓慢。这是由于栅压较小时,沟道中面电子密度较小,这时沟道中的电子迁移率随电子浓度的减小而减小^[12]。由于跨导与迁移率成正比,所以在低栅压下器件的跨导较小。当界面态密度增大时,跨导随栅压的变化减小,而且趋于常数,同时可以看到与界面态密度较小或无界面态时相比在低栅压下跨导增加,

在高栅压下器件跨导减小。因此,可以看出总的趋势是在一定栅压以上界面态密度增加使器件的跨导降低,并趋于一常数。这是因为界面态密度增加时电子的迁移率减小,器件的跨导减小,而当界面态密度增加时沟道电子受栅压的影响减小,跨导也受栅压的影响减小。

4 结论

从上面的结果和分析可以得出结论,当界面态密度小于 $1.0 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$ 时界面态对 Al-GaAs/GaAs HEMT 器件直流性能的影响不明显;但是当界面态密度大于 $1.0 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$ 时界面态对器件的电流-电压特性有较大的影响。随着界面态密度的增加,栅极电压对沟道电流的控制能力减小,从而使器件的跨导减小。

参 考 文 献

- [1] S. K. Chung, Y. Wu *et al.*, IEEE Trans Electron Devices, 1987, **34**(2): 149~ 153
- [2] A. P. Young and H. H. Wieder, J. Vac. Sci. Technol., 1996, **B14**(3): 2293
- [3] W. P. Hong, J. E. Oh *et al.*, IEEE Trans Electron Devices, 1988, **35**(10): 1585~ 1590
- [4] G. Inge and D. Pavlidis, IEEE Trans Electron Devices, 1991, **38**(4): 862~ 870
- [5] H. Wang, G. Inge *et al.*, Electron Lett., 1996, **32**(21): 2026~ 2028
- [6] A. Thomasian *et al.*, Electron Lett., 1990, **26**(14): 1094~ 1096

- [7] H. Sibari, A. Raymond *et al* , *Semicond Sci Technol* , 1996, **11**: 1002~ 1008
- [8] X. H. Zhang, Y. F. Yang and Z. G. Wang, *半导体学报*, 1997, **18**(8): 636~ 640 (In English).
- [9] 张兴宏, 杨玉芬, 王占国, *半导体学报*, 1998, **19**(3): 191~ 196
- [10] G. Wang and W. Ku, *IEEE Trans Electron Devices*, 1986, **33**: 657~ 663
- [11] T. J. Drummond, H. Morkoc, K. Lee and M. Shur, *IEEE Electron Device Lett* , 1982, **3**: 338~ 341
- [12] K. Hess, *Appl Phys Lett* , 1979, **35**: 484

Influence of Interface States on Characteristics of AlGaAs/GaAs HEMT Direct Current Output

Zhang Xinghong, Cheng Zhiqun, Xia Guanqun, Xu Yuansen

(*Shanghai Institute of Metallurgy, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050*)

Yang Yufen, Wang Zhanguo

(*Laboratory of Semiconductor Materials Science, Institute of Semiconductors,
The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083*)

Received 9 July 1998, revised manuscript received 11 September 1998

Abstract The influence of interface states on the characteristics of AlGaAs/GaAs high electron mobility transistor (HEMT) direct current output (DCO) has been quantitatively analyzed for the first time by using an analytical model of HEMT DCO. Considering the action of the interface states in AlGaAs/GaAs heterostructure, we have analyzed the effect of interface states on current-voltage characteristics and transconductance of HEMT in detail. Our calculated results reveal that the control capability of the gate voltage on the channel current reduces, and the transconductance of the device decreases with increasing the interface state density.

EEACC: 2560S, 2560B