

AlGaIn/GaN 异质结场效应晶体管的阈值电压

林兆军[†] 赵建芝 张 敏

(山东大学物理与微电子学院, 济南 250010)

摘要: 利用 AlGaIn/GaN 异质结场效应晶体管 (AlGaIn/GaN HFET) 栅结构的电容-电压 (C-V) 特性确定 AlGaIn/GaN HFET 的阈值电压. 通过对模拟计算得到的 AlGaIn/GaN HFET 电流-电压 (I-V) 特性曲线与测试得到的 AlGaIn/GaN HFET 曲线比较分析, 证实了依据 AlGaIn/GaN HFET 栅结构的 C-V 特性曲线的微分极值点确定阈值电压是一种切实可行的方法.

关键词: AlGaIn/GaN HFET; 阈值电压; C-V 曲线

EEACC: 2560B

中图分类号: TN386

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)S0-0422-04

1 引言

近年来, GaN 基材料由于其宽带隙和高的饱和电子漂移速度一直作为高频、大功率半导体电子器件研究领域的热点而引起人们的极大兴趣并受到广泛关注, AlGaIn/GaN HFET 正是这一研究领域的重要代表^[1-3]. 阈值电压是 AlGaIn/GaN HFET 的重要参数, 它一般通过器件的转移特性曲线和不同栅压下的跨导曲线来确定, 如果器件的跨导极值对应的栅偏压值较大, 这种方法确定器件的阈值电压将具有一定的难度. 由于 AlGaIn/GaN 异质结构中存在较强的压电极化和自发极化, 使得非掺杂的 AlGaIn/GaN 异质结在异质界面处可产生高达 10^{13} cm^{-2} 的二维电子气^[4], 使得采用一种新方法确定 AlGaIn/GaN HFET 阈值电压成为可能. 本文结合 AlGaIn/GaN 异质结构的特性, 依据测定的 AlGaIn/GaN HFET 肖特基栅接触的 C-V 特性曲线确定 AlGaIn/GaN HFET 阈值电压.

2 实验

采用金属有机化学气相沉积 (MOCVD) 方法在 (0001) 晶向的蓝宝石衬底上生长 AlGaIn/GaN 异质结构材料. 首先, 在蓝宝石衬底上生长 40nm 的 AlN 缓冲层, 接着在缓冲层上生长非掺杂的 $3 \mu\text{m}$ 的 GaN 层, 最上面一层是 21.5nm 厚的非掺杂 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ 层. AlGaIn/GaN HFET 的器件结构如图 1 所示. 中心圆 (直径 $100 \mu\text{m}$) 和外侧圆环 (内径/外径: $300 \mu\text{m}/420 \mu\text{m}$) 为欧姆接触, 中心圆作为源电



图 1 AlGaIn/GaN HFET 器件结构
Fig. 1 AlGaIn/GaN HFET device structure

极, 外侧圆环作为漏电极, 中间的圆环 (内径/外径: $120 \mu\text{m}/280 \mu\text{m}$) 是肖特基接触, 作为栅电极. 欧姆接触是由 Ti/Al/Mo/Au 4 层金属组成, 通过电子束蒸发及剥离工艺将 4 层金属蒸发至材料结构表面, 后经 850°C , 30s 的快速热退火处理, 使其形成良好的欧姆接触. 肖特基接触同样采用电子束蒸发和剥离工艺将 Ni/Au 两层金属蒸发至材料结构表面. 室温霍尔测量的二维电子气密度和载流子迁移率分别为 $1.36 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 和 $1200 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$. 室温 C-V 曲线的测试通过 Agilent4284A 测试仪在 10kHz 的频率下测得, 而室温 I-V 曲线测试是利用 Agilent4156 半导体参数测试仪测得.

3 结果与讨论

图 2 是圆形 AlGaIn/GaN HFET (结构如图 1 所示) 室温下测得的栅-源间 C-V 曲线.

通过 C-V 曲线的积分, 可以得到对应不同栅偏压下 AlGaIn/GaN 异质结构中的电子密度^[5]

$$n(V) = \frac{1}{qS} \int_{-16}^V C dV \quad (1)$$

式中 S 是栅极面积, 为 $\pi(r_1^2 - r_2^2)$, r_1 和 r_2 分别

[†] 通信作者. Email: linzj@sdu.edu.cn

2006-11-30 收到, 2006-12-13 定稿

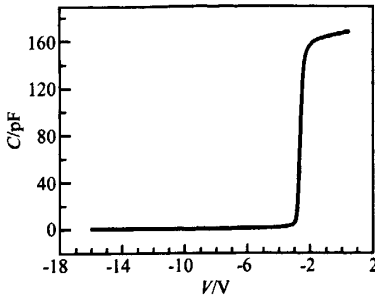


图2 AlGaIn/GaN HFET 栅、源间 C-V 曲线

Fig.2 C-V curve of AlGaIn/GaN HFET between gate and source

是栅极的内外半径; q 是电子电荷。

对图2的 C-V 曲线进行积分和微分可得到图3,从图3可以看出电容积分有明显的拐点,该拐点数值对应电容微分曲线的最大值,其数值为 -2.7V。

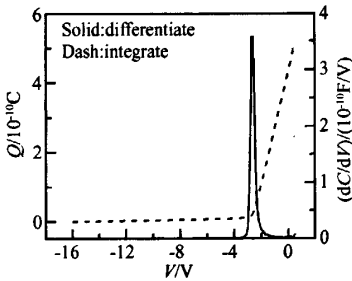


图3 栅、源 C-V 曲线的积分和微分曲线

Fig.3 Integration and differentiation curves of gate and source C-V curve

图3表明 AlGaIn/GaN 异质结构中的电子分为两部分,一部分电子随外加栅偏压的变化呈现明显的变化(图3栅偏压大于 -2.7V 的部分),另一部分电子随外加栅偏压变化得非常缓慢(图3栅偏压小于 -2.7V 的部分)。这说明栅偏压对 AlGaIn/GaN 异质结构中的一部分电子具有明显的调制作用,而对另一部分电子的调制作用很弱。由此,我们将 AlGaIn/GaN 异质结构中具有明显调制作用的那部分电子定义为沟道的传导电子,并将 C-V 曲线微分极值点处的电压值 -2.7V 定义为阈值电压,这样对应不同栅压下沟道中参与传导的二维电子气密度 n_{2D} 为:

$$n_{2D}(V) = \frac{1}{qS} \int_{-2.7}^V C dV \quad (2)$$

图4是 $n_{2D}(V)$ 曲线,该曲线近似为一直线。由此取 (0V, $6.7 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$), (-2.7V, 0 cm^{-2}) 两点拟合的直线近似 $n_{2D}(V)$ 的曲线,得到:

$$n_{2D}(V) = 1.924 \times 10^{12} V + 5.195 \times 10^{12} \quad (3)$$

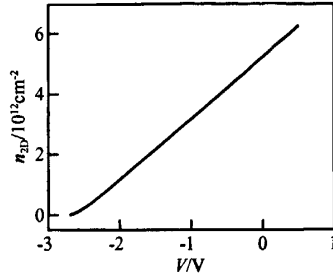


图4 不同栅压下沟道中参与传导的二维电子气密度曲线

Fig.4 Relationship between conductive two-dimensional-electron-gas density and gate bias

通过对圆形 AlGaIn/GaN HFET 测试和模拟计算得到的电流-电压 (I - V) 曲线的对比分析证实阈值电压 $V_T = -2.7V$ 。

对于圆形 AlGaIn/GaN HFET,在 I - V 曲线的线性区其沟道圆环的微分电阻为:

$$dR = \frac{dr}{2\pi r q \mu_0 \int_0^{x_j} n dx} \quad (4)$$

这里 r 是沟道圆环的半径; μ_0 是电子迁移率; q 是电子电荷; x_j 是垂直异质界面方向三角形势阱的宽度; n 是三角形势阱中的电子浓度; $\int_0^{x_j} n dx$ 即沟道中参与传导的二维电子气密度 n_{2D} ; 沟道圆环的微分电压为:

$$dV = I_D dR = \frac{I_D dr}{2\pi r q \mu_0 n_{2D}} \quad (5)$$

其中 I_D 是圆形 AlGaIn/GaN HFET 的沟道电流。

对(5)式进行积分:

$$\int_{V_D}^{V_S} n_{2D}(V_G - V) dV = \frac{I_D}{2\pi q \mu_0} \int_{r_2}^{r_1} \frac{dr}{r} \quad (6)$$

这里 V_S 是源极电压; V_D 是漏极电压; r_1 是栅极内半径; r_2 是栅极外半径; V 是沟道中各点的电压值。(6)式中没有考虑源、漏电阻 R_S 和 R_D 的影响。考虑源、漏电阻的影响,做积分变换用 u 代替 $V_G - V$, (6)式转化为:

$$\int_{V_G - I_D R_S}^{V_G - (V_D - I_D R_D)} n_{2D}(u) du = \frac{I_D}{2\pi q \mu_0} \int_{r_2}^{r_1} \frac{dr}{r} \quad (7)$$

其中:

$$R_S = \int_{r_0}^{r_1} \frac{dr}{q \mu_0 \times 2\pi r n_{2D}} = \frac{1}{2\pi q \mu_0 n_{2D}} \ln \frac{r_1}{r_0} \quad (8)$$

$$R_D = \int_{r_2}^{r_3} \frac{dr}{q \mu_0 \times 2\pi r n_{2D}} = \frac{1}{2\pi q \mu_0 n_{2D}} \ln \frac{r_3}{r_2} \quad (9)$$

r_0 和 r_3 分别是源极半径和漏极内半径。

由于 AlGaIn 势垒层几十个纳米的厚度相对于栅漏、栅源微米级长度微不足道,所以栅压调制作用只对栅极下方的沟道起明显作用,对于源栅、漏栅之间的载流子影响甚弱,这样 R_S 和 R_D 中的二维电

子气密度及载流子迁移率均取栅压为零时的数值。(7)式即为圆形 AlGaIn/GaN HFET 线性工作区的电流电压方程。

依据(7)式对圆形 AlGaIn/GaN HFET 的 $I-V$ 曲线进行模拟计算. 计算中 V_D 取 0.1V 为步长, 计算对应的 I_D 值; 对应某确定的 V_G 值, 当 V_D 取某一数值时, I_D 可达到最大值, 该最大值电流对应的电压值即为饱和电压 V_{Dsat} . (7)式积分号内的 $n_{2D}(u)$ 取(3)式. 模拟计算中, 不同栅偏压的载流子迁移率取值如表 1 所示. 对于 AlGaIn/GaN HFET, 不同栅偏压下, 沟道中载流子密度是不同的, 而且载流子在三角形势阱中的分布也有所区别, 因而, 不同栅偏压下的沟道载流子迁移率取不同的数值^[6,7]. 串联电阻 R_s, R_D 的计算中, 取 $\mu_0 = 1380 \text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$, $n_{2D} = 5.195 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$, 由(8)和(9)式计算得到 R_s 和 R_D 分别为 25.12 和 9.45 Ω .

表 1 不同栅偏压下沟道载流子迁移率

Table 1 Mobilities of channel carrier with different gate biases

V_G/V	0.5	0	-0.5	-1	-1.5	-2
$\mu_0/(\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s}))$	1380	1380	1367	1341	1325	1355

模拟计算的 AlGaIn/GaN HFET $I-V$ 曲线与实验测得的 $I-V$ 曲线如图 5 所示, 由图 5 可以看出, 模拟计算曲线与实验曲线吻合得很好。

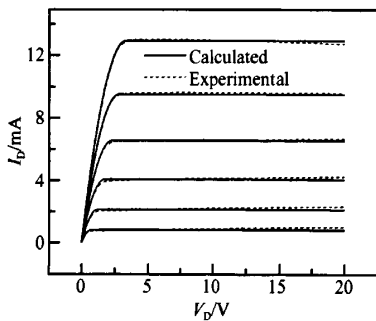


图 5 模拟计算的 AlGaIn/GaN HFET $I-V$ 曲线与测试的 $I-V$ 曲线比较

Fig. 5 Comparison between measured and calculated $I-V$ curves for AlGaIn/GaN HFET

依据:

$$V_T = V_G - (V_{Dsat} - I_D R_D) \quad (10)$$

对应模拟计算曲线, 不同栅偏压下计算得到的饱和漏电压及阈值电压如表 2 所示。

表 2 不同栅偏压下计算得到的饱和漏电压及阈值电压

Table 2 Calculated saturated drain voltage and threshold voltage with different gate biases

V_G/V	0.5	0	-0.5	-1.0	-1.5	-2.0
$I_D R_D/\text{V}$	0.122	0.09	0.062	0.038	0.02	0.007
V_{Dsat}/V	3.3	2.75	2.2	1.7	1.2	0.7
V_T/V	-2.678	-2.66	-2.638	-2.662	-2.68	-2.693

由此表明, 由 AlGaIn/GaN HFET 栅结构的 $C-V$ 曲线微分极值点确定阈值电压是一种切实可行的方法。

4 结论

依据测得的 AlGaIn/GaN HFET 栅结构的 $C-V$ 特性曲线, 取 $C-V$ 曲线微分极值点作为阈值电压, 通过模拟计算 AlGaIn/GaN HFET $I-V$ 曲线与测试得到的 AlGaIn/GaN HFET $I-V$ 曲线分析比较证实: 由 AlGaIn/GaN HFET 栅结构的 $C-V$ 曲线微分极值点作为阈值电压是确定 AlGaIn/GaN HFET 阈值电压的一种切实可行的方法。

参考文献

- [1] Wu Y F, Kapolnek D, Ibbetson J P, et al. Very-high power density AlGaIn/GaN HEMTs. IEEE Trans Electron Devices, 2001, 48, 586
- [2] Lu W, Kumar V, Schwint R, et al. DC, RF, and microwave noise performances of AlGaIn/GaN HEMTs on sapphire substrates. IEEE Trans Microw Theory Tech, 2002, 50, 2499
- [3] Feng Z H, Zhou Y G, Cai S J, et al. Enhanced thermal stability of the two-dimensional electron gas in GaN/AlGaIn/GaN heterostructures by Si_3N_4 surface-passivation-induced strain solidification. Appl Phys Lett, 2004, 85, 5248
- [4] Ambacher O, Foutz B, Smart J, et al. Two dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization in undoped and doped AlGaIn/GaN heterostructures. J Appl Phys, 2000, 87, 334
- [5] Lin Zhaojun, Lu Wu, Lee J, et al. Barrier heights of Schottky contacts on strained AlGaIn/GaN heterostructures, determination and effect of metal work functions. Appl Phys Lett, 2003, 82, 4364
- [6] Ridley B K, Foutz B E, Eastman L F. Mobility of electrons in bulk GaN and AlGaIn/GaN heterostructures. Phys Rev B, 2000, 61, 16862
- [7] Uren M J, Martin T, Hughes B T, et al. Channel mobility in AlGaIn/GaN HFETs on SiC and sapphire substrates. Phys Status Solidi A, 2002, 194, 468

Threshold Voltage of AlGa_N/Ga_N HFET

Lin Zhaojun[†], Zhao Jianzhi, and Zhang Min

(School of Physics and Microelectronics, Shandong University, Ji'nan 250010, China)

Abstract: The threshold voltage of AlGa_N/Ga_N heterostructure field effect transistor (AlGa_N/Ga_N HFET) has been determined by the capacitance-voltage (*C-V*) characteristics of Schottky gate contacts. The measured and calculated current-voltage (*I-V*) characteristics for AlGa_N/Ga_N HFET show that the threshold voltage for AlGa_N/Ga_N HFET can be gotten by the maximum point of the differential *C-V* characteristics.

Key words: AlGa_N/Ga_N HFET; threshold voltage; *C-V* curves

EEACC: 2560B

Article ID: 0253-4177(2007)S0-0422-04

[†] Corresponding author. Email: linzj@sdu.edu.cn

Received 30 November 2006, revised manuscript received 13 December 2006