

Al组分对 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 高电子迁移率晶体管性能的调控研究

王进军*, 刘宇, 徐晨昱, 杨嘉伦, 李梓腾, 段玉博
(陕西科技大学 电子信息与人工智能学院, 陕西 西安 710021)

摘要:为了研究Al组分对 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 高电子迁移率晶体管(High Electron Mobility Transition, HEMT)性能的调控作用,采用Silvaco TCAD软件建立了 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ HEMT数值计算模型,通过数值计算的方法研究了Al组分对 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结的能带、极化电荷、二维电子气(two-dimensional electron gas, 2DEG)及其输运特性、器件转移特性、输出特性的影响。得到了势阱深度、极化电荷面密度、2DEG浓度、沟道电子迁移率、阈值电压、峰值跨导、漏极电流随着Al组分的变化规律,并利用极化、能带、器件物理相关理论对结果进行了分析与讨论。结果表明:势阱深度、极化电荷面密度、2DEG面密度都随着Al分数的增加而增加;沟道电子迁移率随着分数的增加而减小;Al组分较小时,阈值电压绝对值、漏极电流随着Al分数的增加而增加,Al组分较大时阈值电压绝对值、漏极电流随着Al分数的增加而减小;Al分数为0.35时的峰值跨导高达124 mS。

关键词: $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ HEMT; Al组分; 异质结; 二维电子气; 转移特性; 输出特性

中图分类号: TN386 文献标志码: A 文章编号: 0253-2395(2024)02-0369-06

Regulation of the Properties of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ High Electron Mobility Transistor by Al Component

WANG Jinjun*, LIU Yu, XU Chenyu, YANG Jialun, LI Ziteng, DUAN Yubo

(School of Electronic Information and Artificial Intelligence, Shannxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

Abstract: In order to study the effect of Al component on the performance of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ high electron mobility transistor (HEMT), the numerical calculation model of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ HEMT is established by using Silvaco TCAD software. The effect of Al component on the energy band, polarization charge, two-dimensional electron gas (2DEG) and its transport characteristics, device transfer characteristics and output characteristics of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ heterojunction are studied by numerical calculation, and the variation rules of the potential well depth, the polarization charge surface density, the 2DEG concentration, the channel electron mobility, the threshold voltage, the peak transconductance and the drain current with Al component are obtained. The results are analyzed and discussed by using polarization, energy band and device physics theories. The results show that the depth of the potential well, the surface density of polarized charge and the surface density of 2DEG all increase with increasing Al component; the channel electron mobility decreases with the increasing Al component; when the Al component is small, the absolute value of threshold voltage and drain current increase with increasing Al component, but when the Al component is large, the absolute value of threshold voltage and drain current decrease with increasing Al component; the peak of the transconductance is up to 124 mS when the Al component is 0.35.

Key words: $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ HEMT; Al component; heterojunction; two-dimensional electron gas concentration; transfer characteristics; output characteristic

收稿日期: 2022-09-13; 接受日期: 2023-03-15

基金项目: 陕西省教育厅科研计划专项项目(18JK0103)

* 通信作者: 王进军(1980-), 男, 陕西礼泉人, 硕士, 副教授, 研究方向为宽禁带半导体材料与器件。E-mail: wangjinjun6113@163.com

引文格式: 王进军, 刘宇, 徐晨昱, 等. Al组分对 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 高电子迁移率晶体管性能的调控研究[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2024, 47(2): 369-374. DOI:10.13451/j.sxu.ns.2023051

0 引言

以 GaN 为代表的第三代半导体材料具有禁带宽度大、热导率高、抗辐射能力强以及电子饱和迁移率高等诸多优点^[1], 基于 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结制作的高电子迁移率晶体管 (High Electron Mobility Transistor, HEMT) 广泛应用于高温、高频、大功率等领域, 尤其在微波功率器件和高压 DC-DC 转换器件方面表现出优良的性能^[2-6]。然而, 由于 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 界面的极化电荷密度以及因能带不连续形成的势阱深度与 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 中的 Al 组分密切相关^[7-9], 因此 Al 组分会对势阱中二维电子气 (Two-dimensional Electron Gas, 2DEG) 的浓度产生重要影响; 另外, Al 组分也决定着 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 与 GaN 的晶格失配程度, 晶格失配引入的位错和缺陷会对 2DEG 产生散射, 因此 Al 组分也会对 2DEG 的迁移率产生重要影响^[10-14]。

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ HEMT 性能在很大程度上严重依赖 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 界面势阱中 2DEG 的浓度和迁移率^[15-17]。为进一步提升 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ HEMT 性能, 研究 Al 组分对 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ HEMT 性能的调控作用。本文采用 Silvaco 软件中的器件仿真工具 ATLAS 建立了 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ HEMT 的数值模拟模型, 通过数值模拟计算研究了 Al 组分对 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ HEMT 性能的调控作用, 给出了 Al 组分对 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ HEMT 能带、极化电荷、2DEG 浓度、沟道电子迁移率、器件输出特性以及转移特性的影响规律。

1 数值计算模型

场板 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ HEMT 的器件结构如图 1 所示, 自下而上分别是 300 nm 的蓝宝石衬底、1.075 nm 的高阻型 GaN 缓冲层、100 nm 的非故意掺杂 (unintentional doping, UID) GaN 沟道层、25 nm 的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 势垒层、500 nm 的 Si_3N_4 钝化层, 栅、源、漏三个电极之间用 Si_3N_4 隔开。源电极为 Ti/Al/Ti/Au 复合电极, 其长度 L_s 设置为 $0.5 \mu\text{m}$; 漏电极为 Ti/Al/Ti/Au 复合电极, 其长度 L_d 设置为 $0.5 \mu\text{m}$, 栅极 Ti/Au 为复合电极, 其长度 L_g 设置为 $2 \mu\text{m}$, 栅源电极间距 L_{gs}

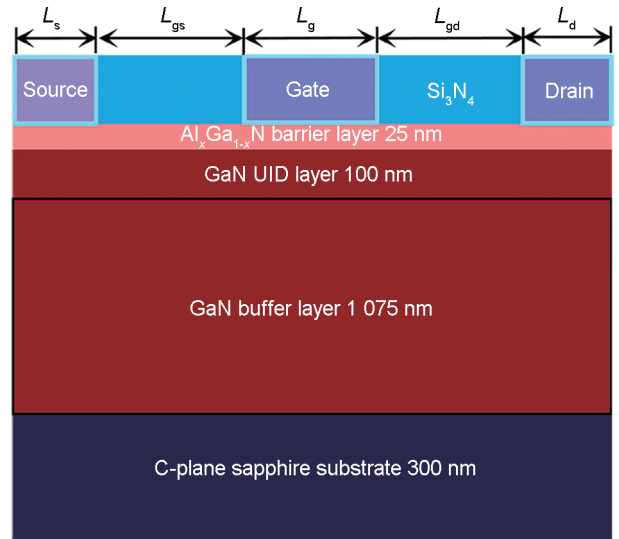


图1 栅场板 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ HEMT 器件结构

Fig. 1 Structure of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ HEMT

$=3 \mu\text{m}$, 栅漏电极间距 $L_{gd}=3 \mu\text{m}$ 。

采用 Silvaco TCAD 软件中的 Atlas 软件建立的栅场板 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ HEMT 数值模拟模型如图 2 所示。图 2 中非故意掺杂 (UID) GaN 沟道层 GaN 在未掺杂的情况下默认为 n 型, 背景载流子浓度设置为 $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 。 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 背景载流子浓度设置为 $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 。源、漏电极与势垒层的接触类型为欧姆接触, 考虑源漏寄生电阻, 设 $R_s=R_d=100 \Omega$; 栅极与势垒层的接触为肖特基接触, 势垒高度设置为 $\phi=0.9 \text{eV}$ 。

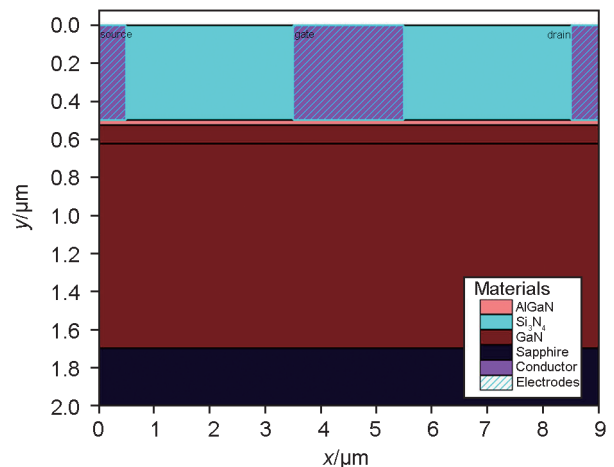


图2 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ HEMT 数值计算模型

Fig. 2 Numerical simulation model of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ HEMT

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 势垒层和 GaN 沟道层界面处产生 2DEG, 2DEG 主要来源是 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 和 GaN 的自发极化效应与压电极化效应。 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 的模型参数可依据 GaN 和 AlN 的模型参数用

Al的摩尔组分线性插值计算得到,GaN和AlN的模型参数如表1所示^[18]。

表1 $T=300\text{ K}$ 材料参数

Table 1 Material parameters with $T=300\text{ K}$

材料参数	GaN	AlN
介电常数 ϵ	9.5	8.5
禁带宽度 E_g/eV	3.47	6.13
自发极化强度 $P_{\text{sp}}/(\text{C}/\text{m}^2)$	-0.034	-0.090
压电极化强度 $P_{\text{pz}}/(\text{C}/\text{m}^2)$	0.028 2	-0.052 5
电子饱和速度 (cm/s)	1.5×10^7	1.5×10^7
有效导带状态密度 $/\text{cm}^{-3}$	2.6×10^{18}	4.1×10^{18}

Al_xGa_{1-x}N的禁带宽度:

$$E_g(x) = xE_g(\text{AlN}) + (1-x)E_g(\text{GaN}) - x(1-x) = 6.13x + 3.47(1-x) - x(1-x), \quad (1)$$

Al_xGa_{1-x}N的自发极化强度:

$$P_{\text{sp}}(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) = xP_{\text{sp}}(\text{AlN}) + (1-x)P_{\text{sp}}(\text{GaN}) + b_{\text{AlGaN}}x(1-x) = -0.09x - 0.034(1-x) + 0.019x(1-x), \quad (2)$$

Al_xGa_{1-x}N的压电极化强度:

$$P_{\text{pz}}(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) = x \cdot P_{\text{pz}}(\text{AlN}) + (1-x) \cdot P_{\text{pz}}(\text{GaN}) = -0.0525x + 0.0282(1-x). \quad (3)$$

为了精确的计算器件内部的载流子运动状态,仿真中选用高场饱和迁移率模型(High-field Saturation Mobility Model),费米统计模型(Fermi Statistics Model)等。模拟计算中涉及的基本方程包括:薛定谔方程,泊松方程,电流连续性方程、扩散-漂移方程^[19]。

$$\frac{\partial^2 \phi(y)}{\partial y^2} + \frac{2m^*}{\hbar^2} [E - V(y)] \phi(y) = 0, \quad (4)$$

$$\nabla^2 \phi = -\frac{q}{\epsilon} (p - n + N_D^+ - N_A^-), \quad (5)$$

$$\nabla \vec{J}_n = qR + q \frac{\partial n}{\partial t}, \quad (6)$$

$$-\nabla \vec{J}_p = qR + q \frac{\partial p}{\partial t}, \quad (7)$$

$$\vec{J}_n = -nq\mu_n \nabla \Phi_n, \quad (8)$$

$$\vec{J}_p = -pq\mu_p \nabla \Phi_p, \quad (9)$$

式中 \hbar 为普朗克常数, m^* 为电子有效质量, $V(y)$ 为电子势能, E 和 ϕ 分别为电子能量和波函数; ϕ 为静电势, ϵ 为介电常数, q 为单位电荷量, n 、 p 分别指电子与空穴密度, N_D^+ 为电离施主浓度, N_A^- 为电离受主浓度; \vec{J}_n 、 \vec{J}_p 分别为电子

和空穴密度, R 为电子和空穴的复合率; Φ_n 、 Φ_p 为电子和空穴的准费米势。

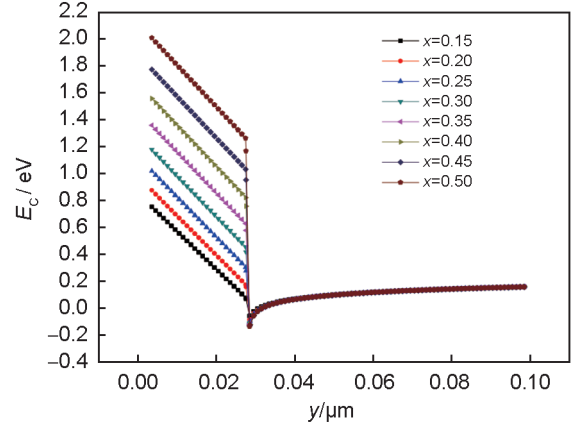


图3 不同Al组分Al_xGa_{1-x}N/GaN异质结导带的能带图

Fig. 3 Conduction band diagram of Al_xGa_{1-x}N/GaN heterojunction with different Al components

通过数值方法联立求解可得到与器件性能有关的各种参数以及器件工作的物理过程。模拟计算过程中不考虑载流子效应,认为载流子的温度和晶格温度相等,均为300 K。

2 结果与讨论

通过改变Al_xGa_{1-x}N中的Al组分,模拟计算了Al组分分别为0.15、0.20、0.25、0.30、0.35、0.40、0.45、0.50时Al_xGa_{1-x}N/GaN异质结的能带、极化电荷密度、2DEG浓度以及Al_xGa_{1-x}N/GaN HEMT的沟道电子迁移率、转移特性和输出特性,Al组分对Al_xGa_{1-x}N/GaN异质结以及Al_xGa_{1-x}N/GaN HEMT的性能具有显著的调控作用。

2.1 Al组分对Al_xGa_{1-x}N/GaN异质结能带的调控

Al组分 x 变化时Al_xGa_{1-x}N/GaN异质界面导带能带如图3所示。从图3中可以看出界面导带的不连续性 ΔE_c 随着Al组分的增加而增加,Al组分从0.15增加到0.50, ΔE_c 从0.13 eV增加到了1.25 eV,Al组分越大势阱越深。这主要是由于Al_xGa_{1-x}N的禁带宽度随着Al组分的增加按照(1)式再增大,Al_xGa_{1-x}N与GaN的禁带宽度差值增大,界面导带不连续性增大。

2.2 Al组分对Al_xGa_{1-x}N/GaN界面极化电荷密度的调控

Al组分 x 变化时Al_xGa_{1-x}N/GaN异质界面极化电荷面密度如图4所示。从图4中可以看

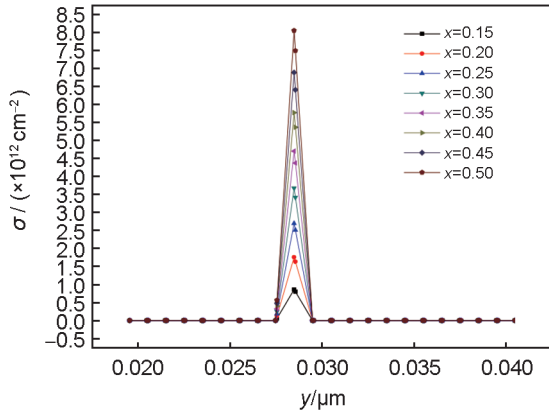


图4 不同Al组分 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 界面的极化电荷密度图

Fig. 4 Polarization charge density diagram of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ interface with different Al components

出界面极化电荷面密度 σ 随着Al组分的增加而增加,Al组分从0.15增加到0.50, σ 从 $0.86 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 增加到了 $8.04 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 。这主要是因为由于 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 的自发极化强度和压电极化强度随着Al组分的增加分别按照(2)式、(3)式再增大,所以总的极化强度在异质界面处的差异变大,极化电荷随之增大。

2.3 Al组分对 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 界面2DEG密度的调控

Al组分 x 变化时 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结界面2DEG面密度图如图5所示。从图5中可以看出界面2DEG面密度 n_s 随着Al组分的增加而增加,Al组分从0.15增加到0.50, n_s 的峰值从 $2.39 \times 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ 增加到了 $1.01 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ 。这主要是因为:一方面随着Al组分增大 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结界面势阱越深,势阱对2DEG的限制能力增强,2DEG面密度增大;另一方面界面处极化电荷密度 σ 随着Al组分的增加而增加,吸引更多的电子到异质结界面,导致2DEG面密度增大。

2.4 Al组分对 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ HEMT沟道电子迁移率的调控

Al组分 x 变化时 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ HEMT沟道(y 方向 $0.76 \mu\text{m} \sim 7.51 \mu\text{m}$ 范围)电子迁移率分布如图6所示。从图6中可以看出沟道电子迁移率 μ 随着Al组分的增加而减小,Al组分从0.15增加到0.50, μ 的峰值从 $1013 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 下降到了 $834 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这主要是因为随着Al组分增大 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 与GaN之间的晶格失

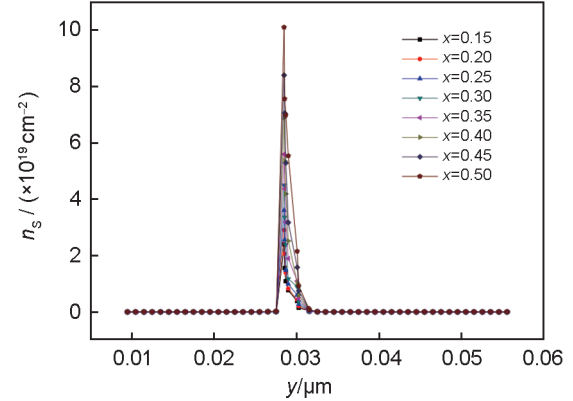


图5 不同Al组分 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 界面的2DEG密度图

Fig. 5 2DEG density diagram of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ interface with different Al components

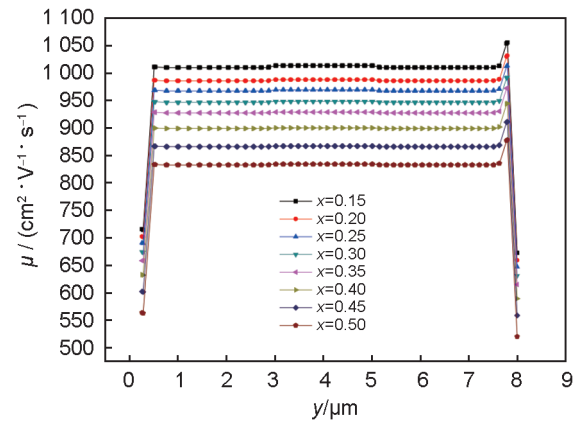


图6 不同Al组分 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ HEMT沟道电子迁移率

Fig. 6 Channel electron mobility diagram of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ HEMT with different Al components

配增加,晶格失配导致的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 界面粗糙度散射和无序合金散射增强,迁移率下降。

2.5 Al组分对 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ HEMT转移特性的调控

漏极电压 $V_D=1 \text{ V}$,Al组分 x 变化时 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ HEMT的转移特性曲线如图7所示。从图7中可以看出,在相同的偏置漏极电压下,Al组分较小时,阈值电压随着Al组分的增加左移,绝对值增大;而当Al组分超过0.35时,阈值电压随着Al组分的增加右移,绝对值减小,但变化不大。这主要是因为当Al组分较小时,相比于极化产生电子的增加,晶格失配引起的迁移率下降可以忽略不计,Al组分增加需要更大的负栅压要消耗界面处自发极化和压电极化产生的电子,阈值电压绝对值增

大;而Al组分较大时,晶格失配引起的迁移率下降不能忽略,迁移率下降使得漏极电流 I_D 减小,阈值电压增大,其绝对值减小。

图8为与图7对应的不同Al组分情况下的跨导曲线,器件峰值跨导均在阈值电压附近,Al组分为0.35的器件的峰值跨导最大,其值高达124 mS。

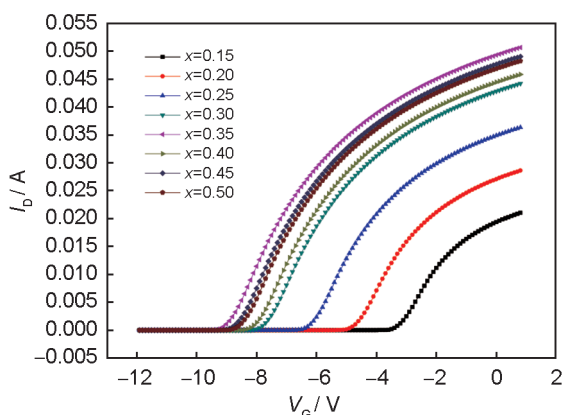


图7 不同Al组分Al_xGa_{1-x}N/GaN HEMT的转移特性曲线

Fig. 7 Transfer characteristic curves of Al_xGa_{1-x}N/GaN HEMT with different Al components

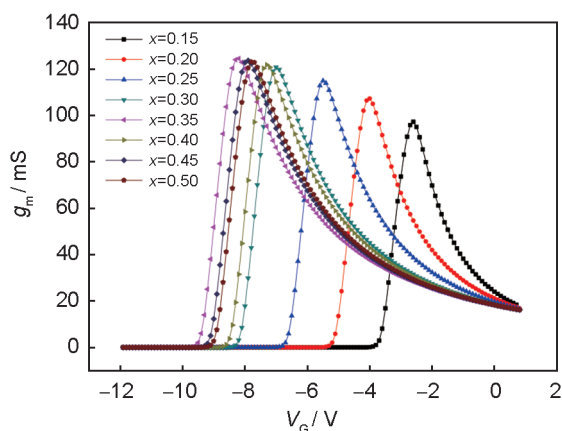


图8 不同Al组分Al_xGa_{1-x}N/GaN HEMT的跨导

Fig. 8 Transconductance of Al_xGa_{1-x}N/GaN HEMT with different Al components

2.6 Al组分对Al_xGa_{1-x}N/GaN HEMT输出特性的调控

栅极电压 $V_G = -3$ V,对漏极电压 V_D 从0~16 V进行扫描,Al组分 x 不同时Al_xGa_{1-x}N/GaN HEMT的输出特性曲线如图9所示。从图9中可以看出,在相同的栅极偏置电压下,Al组分较小时,漏极电流 I_D 随着Al组分的增加而增大;而当Al组分超过0.40时,漏极电流 I_D 随着Al组分的增加反而减小。这主要是因为Al较

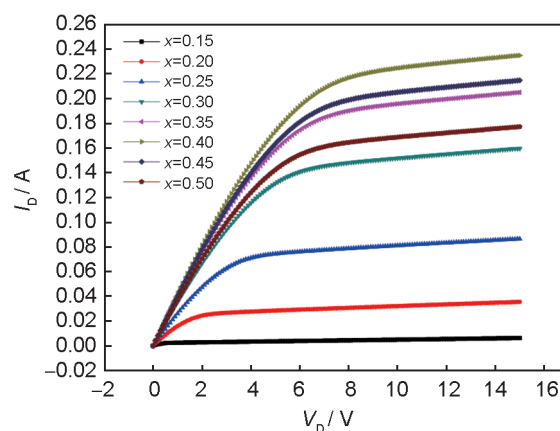


图9 不同Al组分Al_xGa_{1-x}N/GaN HEMT的输出特性曲线

Fig. 9 Transfer characteristic curves of Al_xGa_{1-x}N/GaN HEMT with different Al components

低时,极化带来的极化电荷增加超过了因界面粗糙度散射和无序合金散射带来的迁移率下降,漏极电流 I_D 随着Al组分的增加而增大;而Al组分超过0.40时,因界面粗糙度散射和无序合金散射带来的迁移率下降超过了极化带来的极化电荷增加,漏极电流 I_D 随着Al组分的增加而减小。

3 结论

在建立Al_xGa_{1-x}N/GaN HEMT数值计算模型的基础上,通过数值计算方法求解薛定谔方程、泊松方程、电流连续性方程、扩散-漂移方程给出了Al组分对Al_xGa_{1-x}N/GaN异质结材料及Al_xGa_{1-x}N/GaN HEMT器件性能的调控作用。结果表明随着Al组分的增加,Al_xGa_{1-x}N/GaN异质结界面极化电荷密度与导带不连续性增大,势阱深度增加,势阱对2DEG限制增强,2DEG浓度增加;同时Al组分增加引起的界面粗糙度散射和无序合金散射使得沟道电子迁移率而降低;Al组分较小时,器件阈值电压绝对值和漏极电流随着Al组分的增加而增大;而当Al组分较大时,器件阈值电压绝对值和漏极电流随着Al组分的增加而减小。器件设计时要充分考虑设计需求,针对不同的应用需求选择不同的Al组分以实现较佳的性能。

参考文献:

- [1] OKUMURA H. Present Status and Future Prospect of Wide-gap Semiconductor High-power Devices[J]. *Jpn J Appl*

- Phys*, 2006, **45**(10R): 7565. DOI: 10.1143/jjap.45.7565.
- [2] YANG C, LUO X R, SUN T, *et al.* High Breakdown Voltage and Low Dynamic ON-resistance AlGaIn/GaN HEMT with Fluorine Ion Implantation in SiN_x Passivation Layer[J]. *Nanoscale Res Lett*, 2019, **14**(1): 191. DOI: 10.1186/s11671-019-3025-8.
- [3] WANG X L, CHEN T S, XIAO H L, *et al.* High-performance 2 mm Gate Width GaN HEMTs on 6H-SiC with Output Power of 22.4W@8GHz[J]. *Solid State Electron*, 2008, **52**(6): 926–929. DOI: 10.1016/j.sse.2007.12.014.
- [4] WANG C, HE Y L, ZHENG X F, *et al.* AlGaIn/GaN HEMTs with 0.2 μm V-gate Recesses for X-band Application[J]. *J Semicond*, 2012, **33**(3): 034003. DOI: 10.1088/1674-4926/33/3/034003.
- [5] OHKI T, KIKKAWA T, KANAMURA M, *et al.* An Over 100W AlGaIn/GaN Enhancement-Mode HEMT Power Amplifier[J]. *IEEE Tech Rep*, 2008, **108**(321): 131–136. DOI: 10.1002/pssc.200881533.
- [6] HAO Y, YANG L, MA X H, *et al.* High-performance Microwave Gate-recessed AlGaIn/AlN/GaN MOS-HEMT with 73% Power-added Efficiency[J]. *IEEE Electron Device Lett*, 2011, **32**(5): 626–628. DOI: 10.1109/LED.2011.2118736.
- [7] ZHANG K, CHEN X, MI M H, *et al.* Enhancement-mode AlGaIn/GaN HEMTs with Thin and High Al Composition Barrier Layers Using O₂ Plasma Implantation[J]. *Phys Status Solidi A*, 2015, **212**(5): 1081–1085. DOI: 10.1002/pssa.201431585.
- [8] 王现彬, 王元刚, 房玉龙, 等. 新型Al组分渐变结构的N极性GaIn基HEMT中二维电子气研究[J]. *真空科学与技术学报*, 2014, **34**(12): 1341–1346. DOI: 10.13922/j.cnki.cjovst.2014.12.11.
- WANG X B, WANG Y G, FANG Y L, *et al.* Simulation of 2-D Electron Gas in N-polar GaIn Based HEMT with New Graded Al Content[J]. *Chin J Vac Sci Technol*, 2014, **34**(12): 1341–1346. DOI: 10.13922/j.cnki.cjovst.2014.12.11.
- [9] 倪金玉, 董逊, 周建军, 等. 含有Al组分阶变AlGaIn过渡层的Si基AlGaIn/GaN HEMT[J]. *固体电子学研究与进展*, 2011, **31**(6): 527–531.
- NI J Y, DONG X, ZHOU J J, *et al.* AlGaIn/GaN HEMT on Si Substrate with Al-content Step-graded AlGaIn Transition Layers[J]. *Res Prog SSE*, 2011, **31**(6): 527–531.
- [10] MAO L F. Electrical Double-layer Modeling of Different Al-content on the Performance of AlGaIn/GaN HEMTs[J]. *ECS J Solid State Sci Technol*, 2018, **7**(9): 496–500. DOI: 10.1149/2.0251809jss.
- [11] YAMADA A, YAITA J, NAKAMURA N, *et al.* Low-sheet-resistance High-electron-mobility Transistor Structures with Strain-controlled High-Al-composition AlGaIn Barrier Grown by MOVPE[J]. *J Cryst Growth*, 2021, **560-561**: 126046. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2021.126046.
- [12] HAN X X, HONDAL Y, NARITA T, *et al.* Transport properties of the two-dimensional electron gas in Al_xGa_{1-x}N/GaN heterostructures[J]. *J Phys Condens Matter*, 2007, **19**:046204. DOI: 10.1088/0953-8984/19/4/046204.
- [13] POLYAKOV V M, CIMALLA V, LEBEDEV V, *et al.* Impact of Al Content on Transport Properties of Two-dimensional Electron Gas in GaIn/Al_xGa_{1-x}N/GaN Heterostructures[J]. *Appl Phys Lett*, 2010, **97**(14): 142112. DOI: 10.1063/1.3499656.
- [14] BACA A G, KLEIN B A, ALLERMAN A A, *et al.* Al_{0.85}Ga_{0.15}N/Al_{0.70}Ga_{0.30}N High Electron Mobility Transistors with Schottky Gates and Large on/off Current Ratio over Temperature[J]. *ECS J Solid State Sci Technol*, 2017, **6**(12): Q161–Q165. DOI: 10.1149/2.0231712jss.
- [15] CHEN X, XING Y H, HAN J, *et al.* Influence of Al Composition on Electrical and Structural Properties of Al_xGa_{1-x}N/AlN/GaN HEMT Materials Grown by MOCVD[J]. *Chinese J Lumin*, 2013, **34**(12): 1646–1650. DOI: 10.3788/fgxb20133412.1646.
- [16] JIANG G Y, LV Y J, LIN Z J, *et al.* The Influence of Al Composition in AlGaIn Barrier Layer on Polarization Coulomb Field Scattering in AlGaIn/GaN Heterostructure Field-effect Transistors[J]. *Phys E Low Dimensional Syst Nanostructures*, 2021, **127**: 114576. DOI: 10.1016/j.physe.2020.114576.
- [17] LU S, ZHENG T, JIANG K, *et al.* Regulating the Valence Level Arrangement of High-Al-content AlGaIn Quantum Wells Using Additional Potentials with Mg Doping[J]. *Phys Chem Chem Phys*. 2022, **24**(9): 5529–5538. DOI:10.1039/D1CP04303J.
- [18] 郝跃, 张金凤, 张进成. 氮化物宽禁带半导体材料与电子器件[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 9–16.
- HAO Y, ZHANG J F, ZHANG J C. Nitride Wide Band Gap Semiconductor Materials and Electronic Devices [M]. Beijing: Science Press, 2013: 9–16.
- [19] ATLAS User's Manual: Device Simulation Software [M]. Version 5.20.2. R, SILVACO International, Santa Clara, CA, 2015.