

一种新的磷化铟复合沟道高电子迁移率 晶体管小信号物理模型^{*}

李 潇^{1,2)} 刘 亮²⁾ 张海英²⁾ 尹军舰²⁾ 李海鸥²⁾ 叶甜春²⁾ 龚 敏¹⁾

1) 四川大学物理科学与技术学院, 成都 610064)

2) 中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

(2005 年 12 月 19 日收到, 2006 年 2 月 17 日收到修改稿)

针对磷化铟(InP)复合沟道高电子迁移率晶体管(HEMT)的特点,对常规单沟道 HEMT 的小信号物理模型进行了修正,提出了一种新的用于复合沟道 HEMT 的小信号物理模型,用商用器件模拟软件 ISE(integrated systems engineering)对其进行了仿真验证,对比了实测和仿真的 $I-V$ 特性及转移特性曲线,重点研究了在 InGaAs/InP 双层沟道中考虑量子效应后的电场和电流密度随着不同栅电压的变化趋势,研究结果表明,由于在沟道中存在量子效应,在栅下靠源端低电场区域,电流主要分布在 InGaAs 沟道,而在靠漏端高电场区域,电流主要分布在 InP 沟道,电流在 InGaAs 与 InP 沟道中的分配比例随着栅压的变化而变化,从而验证了新模型的正确性.

关键词:高电子迁移率晶体管,复合沟道,物理模型,磷化铟

PACC:7280E,7360L,6185

1. 引 言

随着信息技术向数字化,网络化方向的迅速发展,对超大容量信息传输,超快实时信息处理和超高密度信息存储提出了越来越高的要求,InP 基纳米栅 HEMT 器件被公认为是在 40—100Gb/s 传输速率的光纤通信用电路及微波,毫米波以及亚毫米波无线通信应用的首选.就衬底材料而言,InP 与 GaAs 相比,击穿电场、热导率、电子饱和速率均更高.用它制作的 HEMT 器件的截止频率已经达到了 562GHz^[1],这是目前三端器件的最高水平.用 InP 基 HEMT 制作的低噪声放大器,压控振荡器等都具有其他器件不可比拟的优越性.

InP 衬底 HEMT 的优点是工作频率极高但噪声极低,缺点是 In_{0.53}Ga_{0.47}As 沟道 HEMT 的耐击穿电压低,从而限制了其大功率应用.为了在保持器件高频性能的基础上,提高耐压能力,人们采用了 InGaAs/InP 复合沟道结构. In_{0.53}Ga_{0.47}As 具有很高的电子迁移率(室温时可达 13000cm²(V·s)),InP 具有很高的电子峰值漂移速度(2.5 × 10⁷cm/s)^[2],InP 的电离阈

值能量(1.69eV)比 In_{0.53}Ga_{0.47}As(0.92eV)高^[3],所以耐电压击穿能力比 In_{0.53}Ga_{0.47}As 强.这种结构综合利用了低场时 InGaAs 的高电子迁移率特性及高场时 InP 的高电离阈值能量和高饱和速率,既提高了 HEMT 的漏极-源极击穿电压,也保证了其优良的毫米波频率特性.

为了将器件用于电路设计,准确的小信号模型是必不可少的,常用的 HEMT 模型有很多,如 Angelov HEMT Model, Second Generation Angelov (Chalmers) Model, Curtice Cubic Nonlinear FET Model, Modified Materka FET Model, SPICE TOM1 FET Model, EE-HEMT1-Model,但目前国内外尚无专门针对复合沟道 HEMT 开发的模型,所以我们对此开展了研究.

本文首先介绍复合沟道 HEMT 及其电子浓度分布的特点,并在常规沟道 HEMT 的小信号物理模型基础上提出了一种新的物理模型,然后用 ISE 进行了仿真验证,对比了仿真和实测的 $I-V$ 特性及转移特性,模拟了沟道中电子浓度分布,电场分布随着栅压的变化规律,仿真结果表明了新模型的正确性,为器件材料结构的优化设计,以及参数提取打下了基础.

2. InP 基复合沟道 HEMT

2.1. InP 基复合沟道 HEMT 击穿电压高的原因

InP 衬底 HEMT 的优点是工作频率极高但噪声极低,缺点是 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 沟道 HEMT 的耐击穿电压低.这是由于在强电场下,窄禁带宽度的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ (0.75eV)^[2] 沟道中存在着强烈的碰撞电离^[4].碰撞电离将产生很多消极的影响,例如降低导通态和截止态的击穿电压,增加输出电导,和引起 Kink^[4]效应.减少碰撞电离的一种方法是降低 InGaAs 沟道中 In 的组分,提高沟道的禁带宽度,从而提高 HEMT 的击穿电压;然而,在降低 In 组分的同时也降低了 InGaAs 中的电子迁移率,从而降低了 HEMT 的截止频率.使用宽禁带的 InP (1.35eV)^[2] 作为 HEMT 沟道可以大幅度提高器件漏极-源极击穿电压,因为 InP 在高场下具有很高的饱和电子漂移速度 ($2.5 \times 10^7\text{cm/s}$)^[2],但在低场下的电子迁移率 ($5400\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$)^[2] 却比 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ ($13000\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$)^[2] 低得多,从而降低了 HEMT 在毫米波段的增益和附加效率,而且使用 InP 沟道比较难于得到低的接触电阻,为兼顾 HEMT 漏极-源极击穿电压和频率性能,人们用 InGaAs/InP 共同形成 HEMT 的导电沟道.这种结构综合应用了低场时 InGaAs 的高电子迁移率特性及高场时 InP 的高阈值能量和高饱和速率,既提高了 HEMT 的漏极-源极击穿电压,也保证了其优良毫米波频率特性.

2.2. 复合沟道中势能和电子浓度分布

当 InGaAs 沟道层的厚度减小到可以与电子的德布罗意波长相比拟时,电子的波粒二象性表现出来,主要表现为在沟道中沿平行于异质结平面方向的电子状态量子化,在源侧低电场区,电子主要集中在 InGaAs 沟道层;而在靠近漏一侧的高电场区,主要集中在 InP 层.这个现象我们在 ISE 的仿真中得到了证实.图 1,图 2 为复合沟道 HEMT 中电势和电子浓度分布示意图^[5].

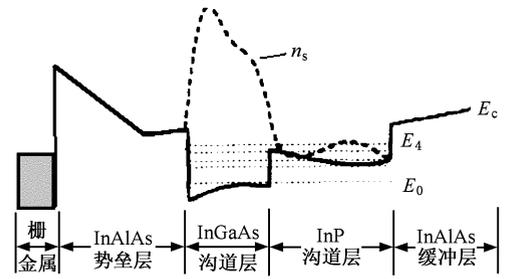


图 1 栅下靠源端势能和电子浓度分布

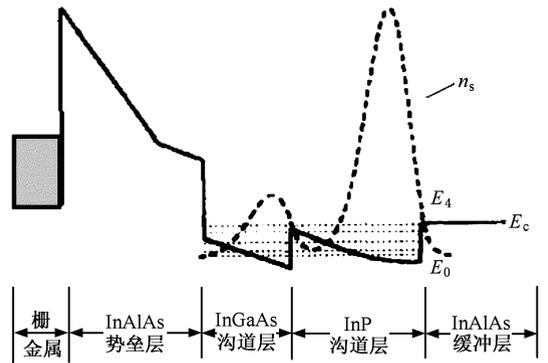


图 2 栅下靠漏端势能和电子浓度分布

修正,提出了一种新的针对复合沟道 HEMT 的小信号物理模型(图 4).

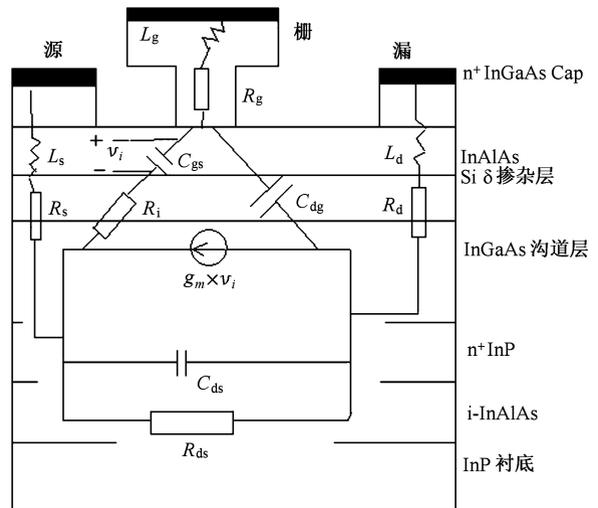


图 3 常规沟道 HEMT 物理模型

3. 复合沟道的小信号物理模型

我们针对复合沟道 HEMT 的特点,在常规沟道 HEMT 小信号模型的基础上^[6],对本征部分进行了

由上图可以看出,在常规单沟道 HEMT 里,用一个受控电流源 $g_m \times v_i$ 表示流过沟道的电流(图 3),而对于复合沟道 HEMT,由于在沟道中存在量子效应,在 InP 沟道中也有一定程度的电流流过,这两股

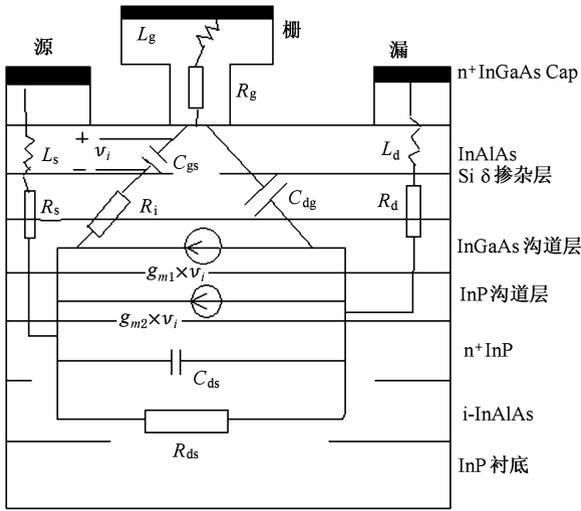


图 4 复合沟道 HEMT 物理模型

电流的大小同时受栅压控制,所以我们用两个受控电流源: $g_{m1}(r, v_{gs}, v_{ds}) \times v_i$ 、 $g_{m2}(r, v_{gs}, v_{ds}) \times v_i$ 来描述 InP 沟道对总源漏电流的贡献(图 4)其中 r 是位置坐标, v_{gs} 、 v_{ds} 分别是栅源电压和漏源电压,它们的比值 $k = g_{m1}/g_{m2}$ 则代表了电流在双层沟道中的分配比例,总的源漏电流大小为 $I_{ds} = (g_{m1} + g_{m2}) \times v_i$, ISE 的仿真结果完全证明了该模型的正确性。

4. ISE 验证复合沟道 HEMT 物理模型

为了对复合沟道 HEMT 的沟道中电流分布随栅压的变化规律有深入的了解,本文用 ISE 对沟道中的量子效应进行了模拟,采用了其提供的 van Dort 量子模型,即在需要考虑量子效应的区域中加入该修正因素并进行仿真,得出了沟道内电场分布和电流密度分布随着不同的栅压的变化趋势,为器件的准确建模提供了理论指导。

van Dort 量子模型简介:随着器件尺寸不断缩小,达到了深亚微米的量级,电子的波动特性将不能再被忽略,为了在仿真中计入量子效应,该模型在常规的电子密度表达式中加入一个新的势能项,即

$$n = N_c \exp\left(\frac{E_{Fn} - E_c - \Lambda}{kT}\right), \quad (1)$$

其中 Λ 为量子效应修正项,它的表达式为

$$\Lambda = \frac{13}{9} \cdot k_{fit} \cdot F(\bar{d}) \cdot \left(\frac{\epsilon\epsilon_0}{4kT}\right)^{1/3} \cdot |(E_n - E_{crit})|^{2/3}, \quad (2)$$

其中 k_{fit} 和 E_{crit} 是拟合参数,函数 $F(\bar{d})$ 定义为

$$F(\bar{d}) = \frac{2\exp(-a^2(r))}{1 + \exp(-2a^2(r))}, \quad (3)$$

$$a(r) = l(r)\lambda_{ref}, \quad (4)$$

其中 $l(r)$ 是点 r 到界面的距离,参数 λ_{ref} 定义了发生量子效应的区域与界面的距离。

仿真所采用的 HEMT 器件结构(图 5)。

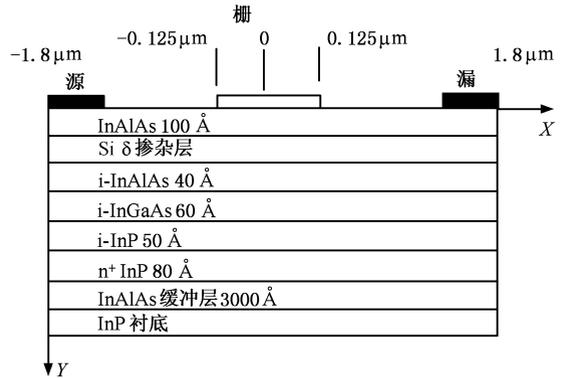


图 5 ISE 仿真采用的器件结构

ISE 仿真结果与实测结果对比(图 6—图 9)。

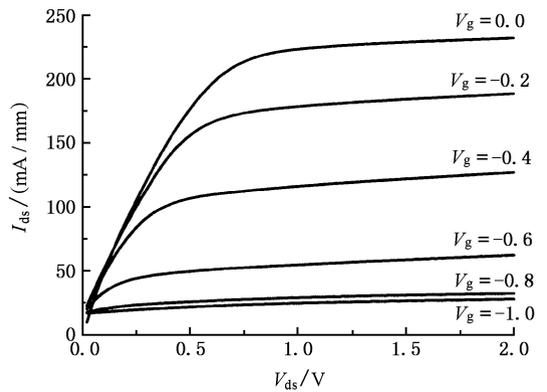


图 6 仿真的器件 I-V 特性

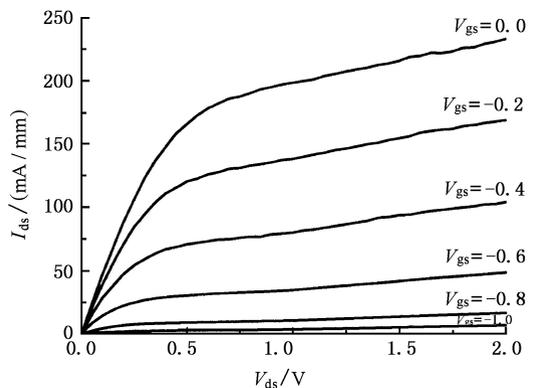


图 7 实测器件 I-V 特性

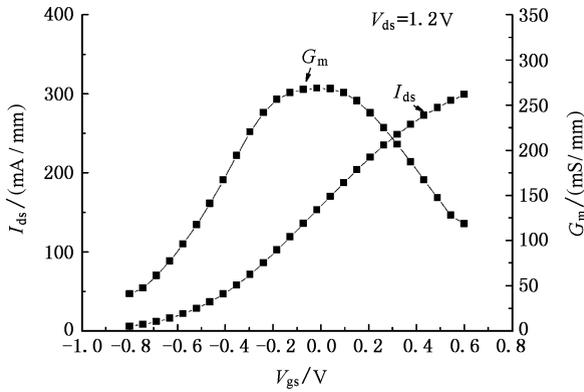


图 8 仿真的器件转移特性和跨导

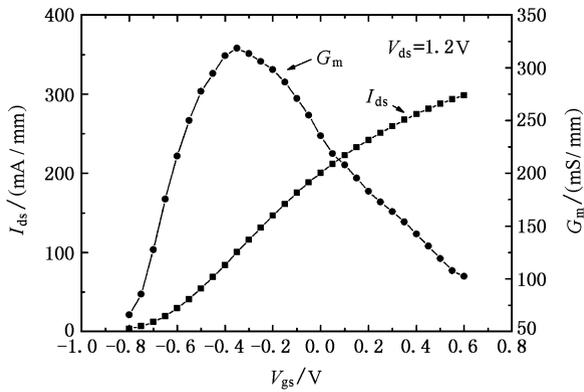


图 9 实测器件的转移特性及跨导

如图,仿真得到的 $I-V$ 特性(图 6)和转移特性及跨导(图 8)与实测结果(图 7,图 9)基本一致,仿真的源漏电流在漏压达到 2V 时已经饱和,但实际器件却并未饱和,这是由于在仿真中没有考虑由 Kink 效应引起的电流增加所致。

我们着重分析了在 InGaAs/InP 双层沟道中的各种物理量随着栅压以及漏压的变化,为了直观起见,把沟道层分成 9 个剖面(如图 10), X 为平行沟道的方向, Y 为垂直沟道方向.我们对 InGaAs/InP 复合沟道内的电场分布,电流分布进行了模拟,为了不失一

般性,分别取每层沟道的中间层作为分析对象,即在 InGaAs 层中取第 3 个截面,InP 层中取第 7 个截面作为分析对象(如图 10)。

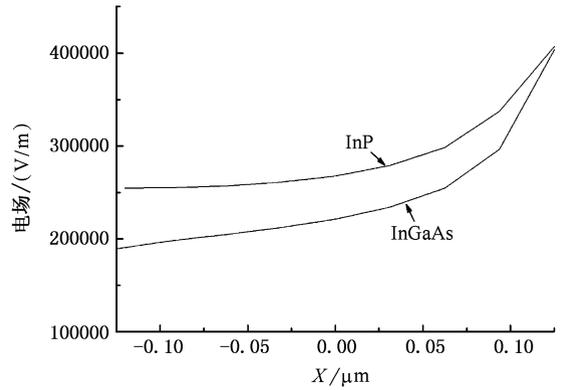


图 11 栅下 InGaAs 和 InP 沟道中电场强度沿平行沟道方向分布

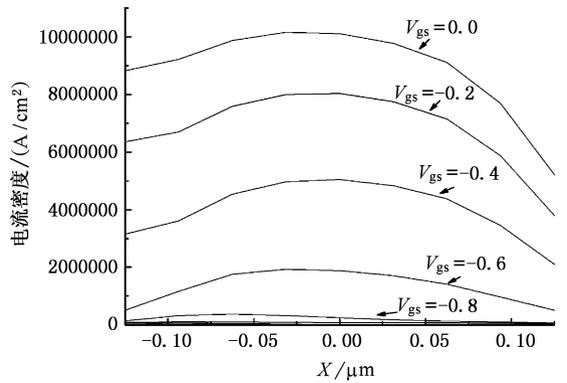


图 12 $V_{ds} = 2V$, InGaAs 层电流密度随栅压的变化($V_{gs} = 0 - -0.8V$)

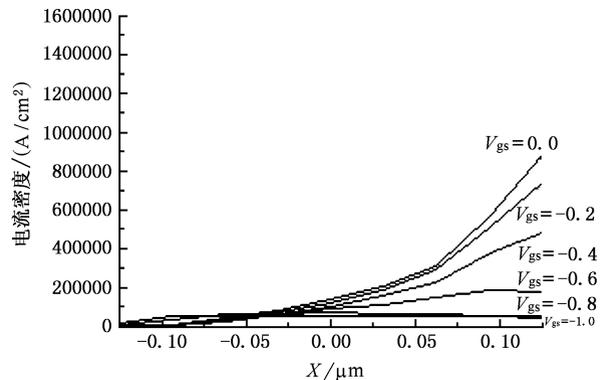


图 13 $V_{ds} = 2V$, InP 层电流密度随栅压的变化($V_{gs} = 0 - 1V$)

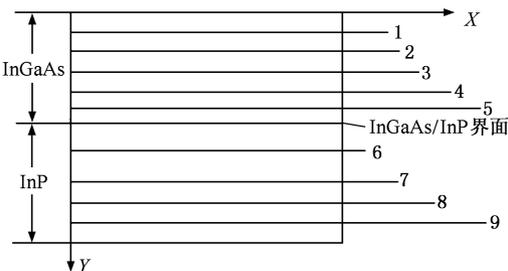


图 10 仿真所用的器件剖面划分

5. 仿真结果分析

从仿真的结果可以明显看出,在器件正常工作

的源漏偏压下 ($V_{ds} = 2V$), 由于在沟道中存在量子效应在栅下靠源端低电场区域, 电流主要集中在 InGaAs 层(图 12), 而在靠漏端高电场区域, 电流主要集中在 InP 层(图 13), 它们同时受到栅压的控制, 可以用两个受控电流源来描述其特性, 于是证明了我们提出的新物理模型用来描述复合沟道 HEMT 是可行的。

6. 结 论

本文针对复合沟道 HEMT 的特点, 对常规沟道 HEMT 的小信号物理模型进行了修正, 加入了具有明确物理意义的反映复合沟道特点的因素, 用商用软件 ISE 对其进行了仿真验证, 证明了新物理模型的正确性, 为器件材料结构的优化设计, 以及模型参数的准确提取奠定了坚实的基础。

- [1] Yoshimi Yamashita , Akira Endoh , Keisuke Shinohara , Kohki Hikosaka , Toshiaki Matsui 2002 *IEEE Electron Dev. Lett.* **13** 573
- [2] Deng Z J , Zheng A S 2004 *Semiconductor Materials* (Beijing : Chemical Industry Press) 57/103(in Chinese) [邓志杰, 郑安生 2004 半导体材料 57/103]
- [3] Boudrissa M , Delos E , Wallaert X , Theron D , De Jaeger J C 2001 *International Conference on Indium Phosphide and Related Materials Conference Proceedings* 196
- [4] Liu H X , Hao Y , Zhang T , Zheng X F , Ma X H 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2242 (in chinese) [刘红侠, 郝跃, 张涛, 郑雪峰, 马晓华 2003 物理学报 **52** 2242]
- [5] Takatomo Enoki , Kunihiro Arai , Atsuo Kohzen , Yasunobu Ishii 1995 *IEEE Transactions on Electron Devices.* **42** 1414
- [6] R. LeeRoss , Stefan . Svensson , Paolo Lugli 1994 *Pseudomorphic HEMT Technology and Applications* (Netherlands :Kluwer Academic Publishers) 48

A new small signal physical model of InP-based composite channel high electron mobility transistor^{*}

Li Xiao^{1,2)} Liu Liang²⁾ Zhang Hai-Ying²⁾ Yin Jun-Jian²⁾ Li Hai-Ou²⁾ Ye Tian-Chun²⁾ Gong Min¹⁾

1) College of Physics Science and Technology , Sichuan University , Chengdu 610064 , China)

2) Institute of Microelectronics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100029 , China)

(Received 19 December 2005 ; revised manuscript received 17 February 2006)

Abstract

In view of the specific properties of InP-based composite channel High Electron Mobility Transistor (HEMT), we made a correction to the traditional single channel HEMT and promote a new small signal physical model which can be applied to composite channel HEMT. The commercial device simulation program-ISE (Integrated Systems Engineering) has been used to simulate and verify this new model. We have compared the measured and simulated HEMT's $I-V$ and transference characteristics. The change of electric field and electric current density in InGaAs/InP composite channel when quantum effect is taken into consideration are studied. The results show that due to quantum effect in InGaAs channel in the area under the gate and near the source where electric field is low, current flow is distributed mostly in the InGaAs channel, while in the area under the gate and near the drain where electric field is high, current flow is distributed mostly in the InP channel. Under different gate voltages, the current flow shows different proportions in both InGaAs and InP channel. The new model is proved to be valid.

Keywords : high electron mobility transistor , composite channel , physical model , InP

PACC : 7280E , 7360L , 6185

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60276021) and the State Development Program of China (Grant No. G2002CB311901).