

Hydrodynamic Simulation of InP/InGaAs SHBT

Liang Kang, Hong-liang Lv, Yu-ming Zhang, Yi-men Zhang, Jun-rui Xu

(School of Microelectronics, Xidian University, Key Laboratory of Wide Band-Gap Semiconductor Materials and Devices, Xi'an 710071, China)

Email:klk1603@163.com

Abstract: Fully thermal hydrodynamic 2D simulations of InP/InGaAs single heterojunction bipolar transistors (SHBTs) are necessary for optimizing the HBT further towards THz and OEIC. To solve the Wigner-Boltzmann equation, six Partial Differential Equations are calculated coupled with Poission equation. The DC characteristics is simulated and agreement between measured and simulated results is achieved. The optimization of the device structure for offset voltage is analyzed.

Keywords: hydrodynamic model; SHBT; numerical simulation;

基于流体动力学模型的 InP 单异质结双极晶体管数值仿真研究

康亮, 吕红亮, 张玉明, 张义门, 许俊瑞

(西安电子科技大学 微电子学院, 宽禁带半导体技术国防重点学科实验室, 陕西 西安 710071)

Email:klk1603@163.com

摘要: 为了优化器件结构, 使 InP/InGaAs 单异质结双极型晶体管能够更好的应用于 THz 高频电路和光电子集成电路, 建立精确的流体动力学仿真模型是非常重要的。本文从求解 Wigner-Boltzmann 方程出发, 将六个偏微分方程与泊松方程联立求解, 得到载流子的能量、动量、浓度与电势的关系。仿真得到器件的直流特性与实验测量值基本相符。此外, 为了减小偏移电压, 我们给出了器件优化设计方案。

关键词: 流体动力学模型; 单异质结双极型晶体管; 数值仿真

1 引言

由于 InP 和 InGaAs 材料的优良性能, InP/InGaAs 异质结双极晶体管 (HBT) 在高速和低功耗应用方面具有很大优势。与双异质结晶体管 (DHBT) 相比, 单异质结晶体管 (SHBT) 的速度更快, 外延结构更简单。近年来, 关于 InP/InGaAs SHBT 的研究相继展开, Walid 等制作的 0.25 微米发射区 InP/InGaAs SHBT 的截止频率达到 452GHz^[1]; Shen 等人制造了可用于 40Gb/s 以上 OEIC 电路的 InP/InGaAs SHBT 器件, 最大振荡频率达到 250GHz^[2]。研究表明, 自热效应和杂质再分布等现象将影响器件性能, 为了进一步提高器件性能, 必须进行更为合理的结构与工艺设计。

建立 InP/ InGaAs SHBT 精确的二维热学流体动力学模型对器件及 100Gb/s 以上电路优化是非常重要的。

由于器件尺寸较小, 且器件内部存在异质结界面的载流子输运, 基于准稳态的漂移-扩散模型 (DDM) 已经不适用于描述其物理过程, 蒙特卡洛 (MC) 模拟方法虽然适用, 但由于计算量较大, 直接用 MC 模拟方法分析耗时费力。流体动力学模型 (HDM) 作为玻尔兹曼 (Boltzmann) 输运方程较好的近似, 计算量比 MC 模拟方法小得多, 是非常好的折中选择。

本文采用半导体器件仿真器 DESSIS 建立了 InP 异质结双极晶体管的数值仿真模型, 考虑了能带窄变效应、复合效应等多种因素。对器件的特性仿真结果表明, 该模型能够较好的反映真实器件特性。

2 器件模型

模拟半导体器件中电子和空穴量子传输的基本方法是 Wigner-Boltzmann 方程, 这是玻尔兹曼方程的

一般量子表达式。Wigner-Boltzman 方程与经典概念有着原则性的不同之处，空间中静电势能量在有限区域中的积分决定了这一点的传输。

动力论方程的运算量很大，这是因为对于三维器件来说，电子和空穴的分布函数是六个变量的函数(三个空间变量，三个动力变量)。而流体力学近似的动力学方程中，载流子的浓度、速度和温度都只是三个空间变量的函数。这大大简化了运算过程，提高了运算速度。流体力学模型包括粒子数目、动量和能量的非线性双曲守恒定律，与泊松方程联立求解静电势。在动量和能量守恒方程中，通过弛豫时间近似模拟载流子-声子散射。这一方法可以准确反应出 III-V 族化合物速度过冲现象。

DESSIS 中采用的传输模型包含了 6 个偏微分方程方程^[3]。在这个模型中，载流子温度 T_n 和 T_p 与晶格温度 T_L 并不相等，与三个基本半导体模型联立，可以求解得到温度。通常，模型包括基本的偏微分方程和电子、空穴及晶格的能量守恒方程。在流体力学模型中，电流密度定义为：

$$J_n = \mu_n(n\Delta E_C + k_B T_n \nabla n + f_n^{td} k_B n \nabla T_n - 1.5 n k_B T_n \nabla \ln m_e) \quad (1)$$

$$J_p = \mu_p(p\Delta E_V + k_B T_p \nabla p + f_p^{td} k_B p \nabla T_p - 1.5 p k_B T_p \nabla \ln m_h) \quad (2)$$

其中 E_c 和 E_v 是导带和价带能量， k_B 是玻尔兹曼常数， μ_n 和 μ_p 是电子和空穴的迁移率， n 和 p 分别是电子和空穴的浓度， m_e 和 m_h 是电子和空穴的有效质量，第一项考虑了静电势，电子亲和势和禁带的空间分布。剩下三项则分别考虑了浓度分布梯度、电子浓度梯度和有效质量随空间变化量。

能量守恒方程表示为：

$$\frac{\partial W_n}{\partial t} + \nabla \cdot S_n = J_n \cdot \nabla E_C + \left. \frac{dW_n}{dt} \right|_{coll} \quad (3)$$

$$\frac{\partial W_p}{\partial t} + \nabla \cdot S_p = J_p \cdot \nabla E_V + \left. \frac{dW_p}{dt} \right|_{coll} \quad (4)$$

$$\frac{\partial W_L}{\partial t} + \nabla \cdot S_L = \left. \frac{dW_L}{dt} \right|_{coll} \quad (5)$$

其中 W_n , W_p , W_L 分别是电子、空穴和晶格的能量密度。

能量通量可以表示为：

$$S_n = -\frac{5r_n}{2} \left(\frac{k_B T_n}{q} J_n + f_n^{hf} \kappa_n \nabla T_n \right) \quad (6)$$

$$S_p = -\frac{5r_p}{2} \left(\frac{k_B T_p}{q} J_p + f_p^{hf} \kappa_p \nabla T_p \right) \quad (7)$$

$$S_L = -\kappa_L \nabla T_L \quad (8)$$

$$\kappa_n = \frac{k_B^2}{q} n \mu_n T_n \quad (9)$$

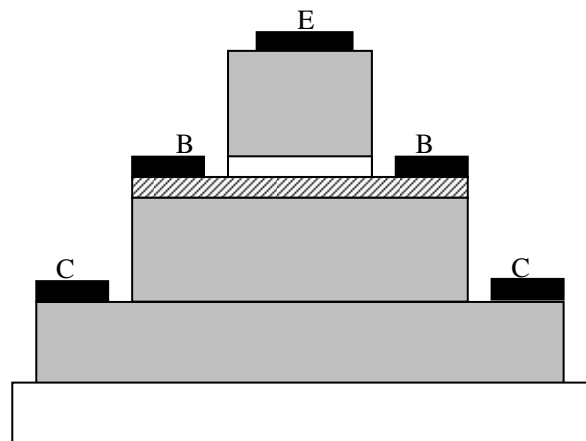
$$\kappa_p = \frac{k_B^2}{q} p \mu_p T_p \quad (10)$$

其中， κ_n 和 κ_p 是对流分量，参数 r_n , r_p , f_n^{td} , f_p^{td} , f_n^{hf} , f_p^{hf} 可以通过定义软件中的相应参数确定。采用不同的参数值仿真，可以很大程度上改变仿真结果。假如定义 $r_n = r_p = 0.6$, $f_n^{td} = f_p^{td} = 0$, $f_n^{hf} = f_p^{hf} = 1$, 则方程与 Stratton 模型^[4]一致。

3 仿真结果

In _{0.53} Ga _{0.47} As	150nm	1×10 ¹⁹ cm ⁻³
InP	50nm	1×10 ¹⁹ cm ⁻³
InP	70nm	3×10 ¹⁷ cm ⁻³
In _{0.53} Ga _{0.47} As	5nm	非掺杂
In _{0.53} Ga _{0.47} As	50nm	3×10 ¹⁹ cm ⁻³
In _{0.53} Ga _{0.47} As	300nm	1×10 ¹⁶ cm ⁻³
In _{0.53} Ga _{0.47} As	50nm	1×10 ¹⁹ cm ⁻³
InP	20nm	1×10 ¹⁹ cm ⁻³
In _{0.53} Ga _{0.47} As	400nm	1×10 ¹⁹ cm ⁻³
InP 半绝缘衬底		

(a)



(b)

Figure 1. (a) Device layer structure (grey color is for n-type area and the diagonal is for the p-type area); (b) Section structure of InP/InGaAs SHBT device.

图 1. (a) 器件外延结构 (灰色为 n 型掺杂区, 斜线为 p 型掺杂区) (b) 器件剖面图

仿真所采用的器件结构与文献[5]相同,该器件基于自对准工艺。为了减小基极和发射极电容,基区宽度设计为 $1\ \mu\text{m}$ 。在半绝缘 InP 衬底上采用 MBE 工艺生长外延层。外延结构示于图 1 (a)。n 型掺杂为 Si, p 型掺杂为 Be。发射区和集电区接触层都是 InGaAs,为了减小接触电阻,掺杂浓度达到 $1\times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ 。发射区外延为 120nm 厚的 InP 层。基区掺杂为 $3\times 10^{19}\text{cm}^{-3}$,厚度为 50nm。在基区和发射区之间有 5nm 厚的非掺杂 InGaAs 层,这是为了阻止 Be 杂质从基区向发射区扩散。正如在传统的 InP SHBT 中一样,InGaAs 既用于基区,也用于集电区。这提高了器件速度,但由于 InGaAs 禁带宽度窄,所以集电区的击穿电压低。器件剖面图示于图 1 (b)。

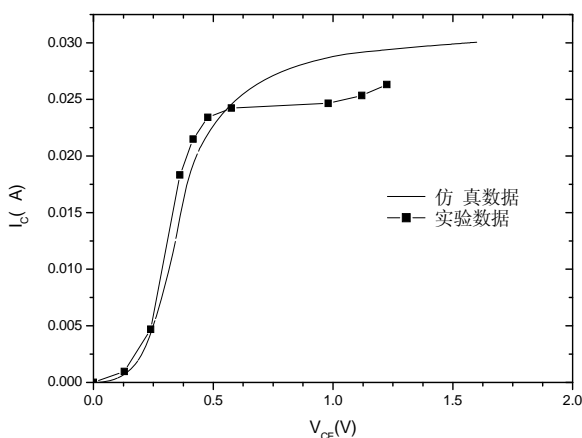


Figure 2. Device I-V characteristics ($I_{BE}=200\mu\text{A}$)
图 2. 器件 I-V 特性 ($I_{BE}=200\ \mu\text{A}$)

图 2 显示了仿真得到的直流 I-V 特性。黑色方块为文献[5]实验测量数据,器件的共发射极偏移电压约为 0.1V。这是因为在集电极-发射极电压较小时,集电结和发射结都处于正偏状态,此时集电极的电流为负值。尤其是当集电结的面积远远大于发射结面积的时候,这一情况更为严重。采用双异质结结构,可以避免这一缺陷。

仿真得到器件 Gummel 曲线如图 3 所示。仿真得到放大系数的最大值为 118,这与实际测量得到的数值非常接近。但放大倍数峰值所对应的偏压却不相同。前者约为 6.3V,后者则为 0.85V。在电压较小时,仿真得到的放大倍数优于实测结果,这是因为实际器件的表面复合速度远远大于仿真时给出的复合速度;在电压较大的时候,有足够的电子进入基区,表面复

合电流不再成为基极电流的主要成分。

造成仿真结果与实验结果有较大差异的另一个原因是,模型中的能量弛豫时间采用了一级近似。能量弛豫时间是能量和掺杂的函数。InP/InGaAs 异质结双极晶体管的基区和集电区很薄,载流子没有足够的时间达到平衡,存在于基区不同位置的载流子具有不同的能量,因此,能量弛豫时间也是空间位置的函数。但在 DESSIS 中,模型采用了近似,认为能量弛豫时间是一个常数平均值。在后续的仿真中,应将蒙特卡洛仿真与流体动力学仿真相结合,以更好的仿真器件特性。

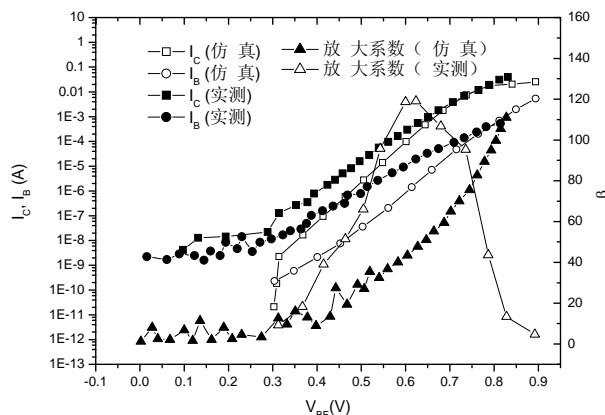


Figure 3. The measured and simulated Gummel plot.
图 3. 器件的 Gummel 曲线

4 结论

半导体器件流体动力学模型是目前较为理想的一种数学模型,该模型充分考虑了模型中非线性项的影响,完整地体现了电流守恒、动量守恒、能量守恒和势能守恒定律。本文采用 Stratton 流体动力学模型对 InP/InGaAs SHBT 进行了二维仿真。模型考虑了掺杂相关迁移率、禁带窄变、热电子发射、SRH 复合等效应。仿真得到的直流特性与实验结果符合较好。

References (参考文献)

- [1] Walid H, Jie-Wei Lai and Milton Feng, [J]. IEEE Electron Device Letters 2003, 24(7): 436-438.
- [2] Shyh-Chiang Shen, David C. Caruth and Milton Feng. [J]. 2002 GaAsMANTECH Conference, 2002.
- [3] Integrated Systems Engineering (ISE) AG, Switzerland, <http://www.ise.ch>.
- [4] R. Stratton. [J]. Phys. Rev., 1962, 126(6):2002-2014.
- [5] Jinyong Yu, et al. [J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2006, 27(10):1732-1735.