

用二维全带组合 Monte Carlo 方法模拟 纤锌矿相 GaN 静电感应晶体管(SIT)特性

郭宝增¹,孙荣霞¹,Umberto Ravaoli²

(1. 河北大学电子信息工程学院,河北保定 071002;

2. Beckman Institute, University of Illinois at Urbana-Champaign, 405 North Mathews Urbana, IL, USA 61801)

摘 要: 报告了用二维全带组合 Monte Carlo 方法模拟纤锌矿相 GaN 静电感应晶体管(SITs)交直流特性的结果. SIT的栅极长度为 $0.13\mu\text{m}$,源极和漏极之间距离为 $0.5\mu\text{m}$. 模拟得到了 SIT 的输出特性,跨导和特征频率特性. 模拟得到的跨导最大值为 140mS/mm ($V_{gs} = -1.5\text{V}$),器件特征频率最大值为 123GHz ($I_{ds} = 3.15\text{A/cm}$). 模拟结果表明纤锌矿相 GaN SIT 具有大功率和高频工作的潜力.

关键词: Monte Carlo 模拟; 氮化镓; 静电感应晶体管; 化合物半导体

中图分类号: TN304.2+3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 08-1121-04

Two Dimensional Full Band, Ensemble Monte Carlo Simulation of Wurtzite GaN Static Induction Transistors (SITs)

GUO Bao-zeng¹, SUN Rong-xia¹, UMBERTO Ravaoli²

(1. College of Electronic and Informational Engineering, Hebei University, Baoding, Hebei 071002 China;

2. Beckman Institute, University of Illinois at Urbana-Champaign, 405 North Mathews Urbana, IL, USA 61801)

Abstract: We present the calculated results of DC and AC characteristics of wurtzite GaN static induction transistor by two dimensional full band, ensemble Monte Carlo simulations. The gate length of SIT is $0.13\mu\text{m}$ and the distance between source and drain is $0.5\mu\text{m}$. We obtained the output characteristics, transconductance and current cutoff frequency characteristics of SIT by the Monte Carlo simulations. The maximum transconductance is 140mS/mm at a gate-source voltage of -1.5V , and the maximum current cutoff frequency is 123GHz at a drain-source current of 3.15A/cm . The calculated results indicates that wurtzite GaN SITs have a potential for applications in high power and high frequency.

Key words: monte carlo simulation; GaN; static induction transistor; compound semiconductor

1 引言

近年来, GaN 材料和器件的研究引起人们的极大兴趣. GaN 材料不仅可以用于光电器件的制造,而且还可以用于高温和高电压器件的制造. 迄今为止已经有多种 GaN 基的高温和高电压器件制造出来,比如调制掺杂场效应晶体管(MOD-FET),金属半导体场效应晶体管(MESFET),金属绝缘物半导体场效应晶体管(MISFET)^[1~3]等. 静电感应晶体管(SIT)是一种短沟道场效应器件,在这种器件中,在源极和漏极之间垂直方向流动的电流由源极下面静电感应的势垒高度控制. SIT特别适合于制造大功率、高温和高频器件,而 GaN 材料也适合制造这类性能的器件. 因此 GaN 材料在制造 SIT 方面具有一定的潜力. 但是,到目前为止还没有关于用 GaN 材料制造 SIT 的报导. 为了探索 GaN SITs 在工作性能方面的潜力,我们

用二维全带组合 Monte Carlo 方法来模拟纤锌矿相 GaN SIT 的交直流特性. 通过模拟,不仅得到了亚微米器件的电子浓度分布,电势分布等内部特性,还得到了器件的输出特性,跨导和器件特征频率等外部特性,这些结果对于以后研究和开发 GaN SITs 具有一定意义.

2 模型描述

图 1(a)所示的是 SIT 截面图. 为了提高器件的功率和工作电流,采用格栅结构. 源极接地电位,漏极接正电位,电子从源极流入,在电场的作用下,漂移到漏极. 栅极位于源极和漏极之间,用于调制载流子浓度.

对于图 1(a)所示的格栅结构,我们只需要模拟其中的一个单元就可以了. 图 1(b)为用于模拟的单元结构,栅极长度为 $0.13\mu\text{m}$,源极和漏极之间距离为 $0.5\mu\text{m}$. 选择亚微米器件进

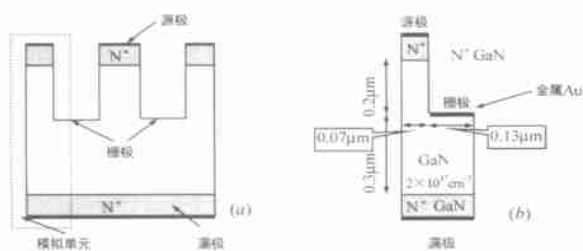


图1 纤锌矿相 GaN SIT 截面图 (a) 栅极结构; (b) 模拟单元
行模拟主要是为了适应 Monte Carlo 模拟器的要求. 大尺寸器件, 将占用大量的计算机内存和计算时间, 不适合使用 Monte Carlo 方法模拟. 器件有源区为 N 型 GaN, 掺杂浓度为 $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. 与源极和漏极相接的区域是高掺杂的 N^+ GaN 层, 以便形成良好的欧姆接触. 栅极金属与 GaN 形成肖特基接触. 假定金属材料为 Au, Au 与 GaN 之间的势垒高度为 $0.98 \text{ eV}^{[4]}$. GaN 是纤锌矿结构, 在垂直方向沿 M 方向 (y 方向), 水平方向沿 K 方向 (x 方向). 表 1 列出了模拟中所用的纤锌矿相 GaN 材料的参数.

表 1 纤锌矿相 GaN 材料参数^[5~7]

禁带宽度 (eV)	3.5
晶格常数 (Å)	
A	3.18
C	5.185
介电常数	
ϵ_0	9.5
	5.35
质量密度 (g/cm^3)	6.095
纵向声子速度 $u_{lo} (\text{cm/s})$	6.6×10^5
横向声子速度 $u_{tr} (\text{cm/s})$	2.7×10^5
声学形变势 (eV)	10.1
谷间形变势 (eV/cm)	1×10^9
极性光学声子能量 (eV)	0.092

用 Monte Carlo 模拟半导体器件的方法已经有一些文献介绍^[8,9], 本文不再赘述. 这里仅对全带和组合的概念作简单介绍. 全带 Monte Carlo 模拟是近年来才开始使用的方法, 与通常使用的基于分析带模型的 Monte Carlo 模拟的相比, 主要是模拟中所用的能量与波矢量关系的模型不同. 在分析带模拟中, 能量与波矢量的关系用数学解析式描述, 而全带模拟方法中, 能量与波矢量的关系是通过能带理论计算得到的. 后者需要计算复杂的能带结构, 但模拟精度高. 组合 Monte Carlo 模拟指的是同时模拟大量载流子的运动轨迹, 而不是模拟单个电子的运动轨迹, 这对于器件模拟是必须的.

我们的模拟包括了纤锌矿相 GaN 导带 8 个量子带的全部能带结构数据. 能带结构数据是通过经验势法计算得到的. 模拟中所包含的散射机理有极性光学声子散射, 电离杂质散射, 声学声子散射, 碰撞电离散射和能谷间散射等. 因为电离杂质散射几率不仅是载流子能量的函数, 同时还是掺杂浓度和载流子浓度的函数, 掺杂浓度与位置有关, 载流子浓度不仅与位置有关还与时间有关, 因此每个计算周期开始时, 都要

重新计算一遍各格点的杂质散射几率.

在模拟中还要设定边界条件. 对欧姆接触和肖特基接触设定为 Dirichlet 边界条件. 对 Dirichlet 边界条件界面势为

$$\phi_s = V_{\text{applied}} - \phi_b(x) \quad (1)$$

其中 V_{applied} 为外加电压, $\phi_b(x)$ 为费米势.

对欧姆接触 (与 N^+ GaN 接触), 在非简并情况下

$$\phi_b(x) = \frac{k_B T}{q} \ln \frac{N_c}{n_s(x)} \quad (2)$$

其中 k_B 为玻尔兹曼常数, T 为晶格温度, N_c 为导带有效态密度, $n_s(x)$ 为表面电子浓度. 对简并情况, 表面费米势通过自洽计算得到.

对肖特基接触 (与 Au 接触), 假定 $\phi_b(x) = 0.98 \text{ eV}$.

对欧姆接触, 边界载流子浓度设定为平衡浓度. 对肖特基接触, 载流子浓度通过势垒高度计算得到, 通常情况下在这些格点上的载流子是耗尽的. 欧姆接触区和肖特基接触区相当于载流子的吸收库, 当载流子进入这些区域时就被吸收了. 此外, 与接触区相邻格点的载流子浓度在整个模拟中应该保持常数, 如果发现这些格点上的载流子浓度低于常数值, 就要注入相应数目的载流子, 注入的载流子状态遵从麦克斯韦分布. 然而, 对于肖特基接触, 通常下载流子处于耗尽状态, 故没有载流子注入发生. 对半导体与绝缘体的边界或其他类型的边界都设定为反射边界, 载流子注入到这些区域时要被反射回来.

每一个模拟周期, 通过求解二维泊松方程, 来确定各格点的电场强度. 泊松方程为

$$-\nabla \cdot (\nabla \phi) = -qn_{MC} + N_D^+(\phi) - N_A^-(\phi) + qp(\phi) \quad (3)$$

其中 ϕ 为电势, N_D^+ 和 N_A^- 分别为电离施主和电离受主浓度, p 为空穴浓度, n_{MC} 为电子浓度, q 为电子电荷, 因为模拟中各格点上的电子是以电子数来表示的, 所以在计算中还要采用 Monte Carlo CIC 方法计算出各格点的浓度. 方程 (3) 右侧与 ϕ 有关的各项通过边界上的准费米能级和各格点的电势来自洽地求出.

在整个模拟中均假

定晶格温度 T 为 300 K.

表 2 给出了二维全带 Monte Carlo 模拟所用的几个主要参数.

表 2 主要模拟参数

电子数	60000
时间步长	$1 \times 10^{-15} \text{ s}$
每组偏压值的计算次数	15000
非均匀格点的宽度	$< 4 \text{ nm}$

3 模拟结果

图 2 所示的是栅源电压 V_{gs} 和漏源电压 V_{ds} 均为零偏情况下 SIT 的电子浓度分布. 图中高电子浓度区域分别为源极和漏极接触的 GaN N^+ 区. 假定栅极接触材料是

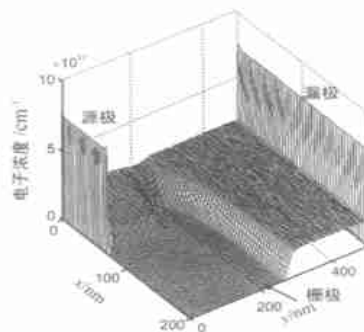


图 2 V_{gs} 和 V_{ds} 均为零偏时的电子浓度分布

Au, Au 与 GaN 之间的势垒高度 0.98eV, Au 与 GaN 形成肖特基接触,在接触区的 GaN 一侧电子被耗尽,从图中可以看到在栅极周围的区域电子浓度最低.除了耗尽区外, SIT 的其他区域的载流子浓度为平衡浓度,浓度为 $2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$.

当栅极加负偏压时,耗尽区将会扩展.图 3 给出了 $V_{ds} = 10\text{V}$ 时, V_{gs} 分别为 -1V 和 -4V 时的电子浓度分布.由于器件尺寸很小,所以电场在器件内各点的分布是不均匀的,因此导致了电子浓度分布的不均匀.比较两种偏置下电子浓度分布,可以看出,电子浓度受栅压控制, $V_{gs} = -4\text{V}$ 时,源漏间导电沟道内的电子基本上耗尽了,因此改变栅极电压可以调制源漏之间的导电.

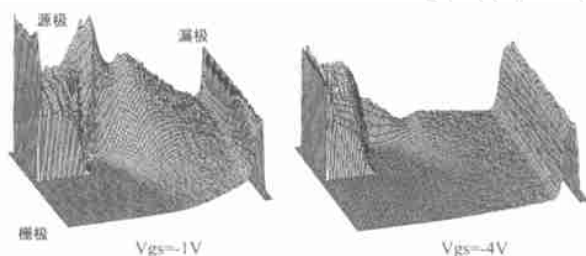


图 3 不同栅源电压下电子浓度分布 ($V_{ds} = 10\text{V}$)

图 4 所示的是 SIT 的输出特性曲线.栅压偏置范围在 -6V ~ 0V 之间.在 V_{gs} 等于 10V 的条件下,饱和漏源电流 I_{ds} 大于 500mA/mm,因为我们模拟的仅仅是 SIT 的一个单元,因此该数值是比较高的,说明

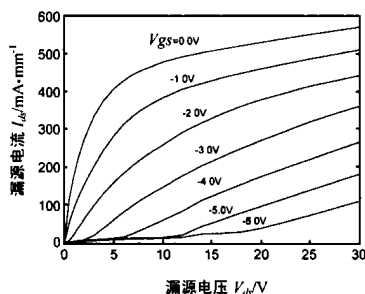


图 4 SIT 的输出特性

这种器件具有大电流工作的潜力.从图中可以看出栅源偏置电压 V_{gs} 较高时,输出特性曲线呈现饱和特性,但随着 V_{gs} 减小,曲线开始呈现非饱和特性,这主要是因为模拟器件的尺寸比较小,在较小的负偏压下,导电沟道就开始夹断,因此在制造器件时应适当增加器件的尺寸,以减小导电沟道夹断的栅源偏置电压.

与输出特性相关的是器件的跨导,图 5 给出了 $V_{ds} = 10\text{V}$ 时跨导随栅极电压变化的曲线.求出这条曲线的方法是,先求出 $I_{ds}-V_{gs}$ 曲线,再用 V_{gs} 对曲线的各点求微分,画出微分值与

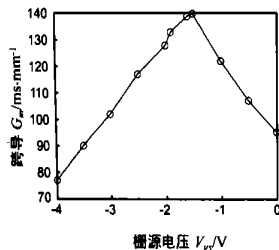


图 5 跨导与栅电压特性
($V_{ds} = 10\text{V}$)

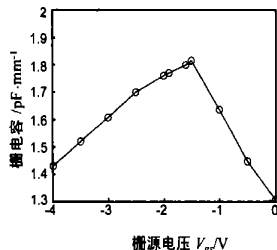


图 6 栅电容与栅电压特性
($V_{ds} = 10\text{V}$)

栅压的关系就是跨导随栅压变化的曲线.从曲线中可以看出,在 $V_{gs} = -1.5\text{V}$ 时,跨导的值最大,最大值为 140mA/mm.因为目前还没有相应的实验值与之比较,因此我们查阅了文献中报导的 GaN 调制掺杂场效应晶体管 (MODFET) 的跨导值,因为器件的工艺和结构参数不同,所以跨导的值也不一样,根据我们掌握的文献看其值在 80 mA/mm ~ 250 mA/mm 之间.因此我们模拟得到的值还是比较合理的,但是数值偏低,因此制造时还要优化结构参数.

器件特征频率是表征器件频率特性的一个的重要参数,此参数可以通过下面的公式计算出来^[2]

$$f_T = \frac{G_m}{2 C_g} \quad (4)$$

其中 G_m 是跨导, C_g 是栅电容.这两个参数均是 V_{gs} 的函数.由式 (4) 可知,要求出器件特征频率随栅压变化的曲线,就要先求出跨导随栅压变化的曲线和栅电容随栅压变化的曲线.前者已经由图 (5) 给出.后者可由下述方法求出.对给定的偏置条件下,可以通过模拟计算,求出电子浓度的分布,因此不难求出总电荷量 Q_g

$$Q_g = q(n_{to} - p_{to} - N_{Dro} + N_{Ato}) \quad (5)$$

其中 n_{to} 是栅极下面的总电子数, p_{to} 是总空穴数, N_{Ato} 是总电离受主杂质数, N_{Dro} 是总电离施主杂质数.给定一个小的栅压增量 V_{gs} ,再重新计算电子浓度的分布和总电荷量.通过两次计算,即可求出总电荷增量与栅压增量,两者之比 (Q_g/V_{gs}) 即为该偏置下的电容.通过这种方法就可以计算出不同偏置下的电容,电容与栅压变化的曲线如图 6 所示.图中的漏源电压为 10V,栅压的范围为 -4V ~ 0V,电容随栅压的变化有一个最大值.最大值在 $V_{gs} = -1.5\text{V}$ 处,其值为 1.82pF/cm.

求出跨导和栅电容后,根据公式 (4) 就可以求出器件特征频率 f_T .图 7 给出了 $V_{ds} = 10\text{V}$ 时,器件特征频率与栅压的关系曲线.从图中可以看出在 $V_{gs} = -1.5\text{V}$ 时,器件特征频率出现最大值,其值为 123GHz,此时漏电流为 3.15A/cm.

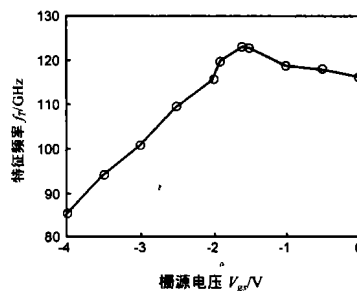


图 7 器件特征频率与栅电压特性
($V_{ds} = 10\text{V}$)

4 结束语

我们用全带组合 Monte Carlo 方法研究了深亚微米 GaN 静电感应晶体管(SIT)的直流和交流特性.本文给出了 SIT 的直流输出特性,跨导、栅电容和器件特征频率与 V_{gs} 的关系.在 $V_{gs} = -1.5\text{V}$ 时,跨导的值最大,最大值为 140mA/mm.在漏极电流为 3.15A/cm,器件特征频率出现峰值,最大值为 123GHz.模拟中得到的高漏源电流密度和高器件特征频率的结果表明 GaN SIT 具有制造大功率和高频器件的潜力.

参考文献:

- [1] M A Khan , X Hu , G Sumin , et al. AlGaIn/ GaN metal oxide semiconductor heterostructure field effect transistor [J]. IEEE Electron Letter , 2000 , 21 (2) : 63 - 65 .
- [2] S Imanaga , H Kawal . Performance of AlN/ GaN heterostructure metal insulator semiconductor field effect transistor based on two-dimensional Monte Carlo simulation [J]. Jpn. J. Appl. Phys. , 2000 , 39 (4A) : 1678 - 1682 .
- [3] Q Chen , M Asif , J W Yang , et al. High transconductance heterostructure field-effect transistors based on AlGaIn/ GaN [J]. Appl. Phys. Lett. , 1996 , 69 (6) : 794 - 796 .
- [4] A C Schmitz , A T Ping , M Asifkhan , I Adesida . Schottky barrier height of Ni , Pd , and Au on n-type GaN [J]. Mat. Res. Soc. Symp. Proc. , 1996 , 395 : 831 - 835 .
- [5] J Kolnik , I H Oguzman , K F Brennan , et al. Electronic transport studies of bulk zincblende and wurtzite phases of GaN based on an ensemble Monte Carlo calculation including a full zone band structure [J]. J. Appl. Phys. , 1995 , 78 : 1033 - 1037 .
- [6] U V Bhapkar , M S Shur . Monte Carlo calculation of velocity-field characteristics of wurtzite GaN [J]. J. Appl. Phys. , 1997 , 82 : 1649 - 1655 .
- [7] S K O ' Leary , B E Foutz , Shur M S , et al. Monte carlo simulation of electron transport in wurtzite aluminum nitride [J]. Solid state communications , 1998 , 105 : 621 - 626 .
- [8] M V Fischetti , S E Laux . Monte Carlo analysis of electron transport in small semiconductor devices including band-structure and space-charge effects [J]. Physical Review B , 1988 , 38 (14) : 9721 - 9744 .
- [9] C H Lee , U Ravaioli . Simulation of a long term memory device with a full bandstructure monte carlo approach [J]. IEEE Electron Device Letters , 1995 , 16 (8) : 360 - 362 .

作者简介:



郭宝增 男, 1953 年 8 月出生于河北承德, 1982 年毕业于河北大学微电子学专业, 1990 ~ 1991 年在英国利兹大学作访问学者, 2000 ~ 2001 年在美国伊利诺依大学作访问学者, 硕士、教授, 现为河北大学电信学院副院长, 目前主要研究方向是半导体材料和器件物理, 半导体器件的 Monte Carlo 模拟等, 共发表论文 50 余篇。



孙荣 女, 1960 年 9 月出生于河北保定市, 1982 年毕业于河北大学微电子学专业, 高级工程师, 主要从事微电子器件工艺物理特性方面的研究。