

226-230

13

毫米波高电子迁移率晶体管的 二维数值模拟

张兴宏 杨玉芬^v 王占国

(中国科学院半导体研究所半导体材料科学实验室, 北京, 100083)

TN320.1

A **摘要** 建立了高电子迁移晶体管(HEMT)的二维数值模型,并用二维数值模拟的方法讨论了AlGaAs/GaAs HEMT中的GaAs沟道层量子阱中二维电子气的物理性质.通过自洽求解薛定谔方程和泊松方程获得了沟道中的电子浓度和横向电场.模拟结果表明栅电压的改变对HEMT器件跨导产生很大的影响.

关键词 二维数值模拟, 二维电子气, 沟道, 跨导.

高电子迁移率 晶体管

引言

随着异质结晶体管技术在高速和高频领域的很快发展,HEMT器件在毫米波频率范围显示了很好的低噪声结果^[1],并发展了不少HEMT的分析模型和数值模型.最早分析一维模型是基于线性的电荷控制模型^[2,3],此模型假设二维电子气离开界面有个常数的校准距离,后来考虑了电子浓度的有效距离^[4].另一种理论是基于漂移扩散模型和能量运输模型^[5,6],但这两种模型没有考虑量子阱中电子能级的分裂.第三种理论是考虑到了异质界面量子阱中电子的量子特性,但K. Yokoyama和K. Hess^[7]用蒙特-卡罗方法自洽求解薛定谔方程和泊松方程仅获得一维的结果.近年来,已经有作者^[8]发展了前面的理论,同时考虑二维问题和自洽求解薛定谔方程及泊松方程.但是,由于异质结器件材料系统的不断发展,所以这方面的工作还有待于进一步的发展.

我们提出一种二维数值模型,用有限差分法自洽求解薛定谔方程和泊松方程,同时考虑了量子阱中电子波函数在空间的扩展和体系统中电子分布相叠加.用二维数值方法讨论了AlGaAs/GaAs HEMT的GaAs沟道层量子阱中二维电子气的物理性质,通过自洽求解薛定谔方程和泊松方程获得了沟道中二维电子气分布和横向电场,还讨论了栅压对HEMT器件跨导的影响.

1 二维数值模型

模拟AlGaAs/GaAs HEMT器件的基本结构如图1所示.模拟中三个基本层为50nm的AlGaAs高掺杂层($N_D=1.0 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$),及3nm未掺杂AlGaAs空间层和未掺杂的GaAs沟道层,图1中虚线表示二维电子气,栅长为 $0.25 \mu\text{m}$,栅的两边离源和漏极的距离为 $0.5 \mu\text{m}$.

栅的势垒高度为 0.8V, 导带不连续的值为 0.32eV. 用于 HEMT 模拟的参数见表 1.

表 1 AlGaAs/GaAs HEMT 模拟中使用的参数
Table 1 The parameters used for the simulation in AlGaAs/GaAs HEMT

ΔE_c (eV)	μ (cm ² /V·sec)	ϵ_A (ϵ_n)	ϵ_B (ϵ_s)	V_s (cm/sec)	E_n (kV/cm)
0.32	7500	12.2	13.1	9.5×10^6	3.2

在 HEMT 中的导电电子限制在二维沟道中运动, 由于 HEMT 材料系统的不断的改进 (如 AlGaAs/InGaAs/GaAs 和 InAlAs/InGaAs/InGaAs/InP 材料系统的发展), 量子阱的深度增加了, 所以量子阱中电子的量子特性越来越明显, 因此要知道界面势阱中的电子态需同时考虑薛定谔方程和泊松方程自洽求解. 我们建立了 AlGaAs/GaAs HEMT 的二维量子模型, 在 GaAs 沟道中考虑电子能级的量子化和电子在量子阱中的空间扩展, 同时考虑二维的有效电势 $V^*(x, y)$, x 沿沟道方向 (横向), y 是从异质界面指向衬底方向 (纵向). 这样, 相应第 m 子能级本征能量 E_m 的电子波函数 F_m 满足薛定谔方程:

$$-\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{d^2 F_m(y)}{dy^2} + V^*(x, y) F_m(y) = E_m F_m(y),$$

(1)

式(1)中 $V^*(x, y) = -eV(x, y) + V_h(y) + V_x(y)$, $V(x, y)$ 是静电势, 横向电场由 $E(x, y) = dV(x, y)/dx$ 得到, $V_h(y)$ 是描述界面势垒的阶梯函数, $V_x(y)$ 为交换关联势^[7]. 泊松方程为:

$$\frac{d^2 V(x, y)}{dx^2} + \frac{d^2 V(x, y)}{dy^2} = -\frac{\rho_B(x, y)}{\epsilon_B},$$

$$\rho_B = eN_{DB} - en(x, y) = eN_{DB} - e \sum_{m=0}^m N_m |F_m(y)|^2,$$

$$N_m = \frac{m^*}{\pi} \frac{k_b T}{\hbar} \ln \left[1 + \exp \left(\frac{E_F - E_m}{k_b T} \right) \right],$$

式中 m^* 为电子有效质量, k_b 为 Boltzman 常数, T 为绝对温度, ρ_B 为沟道中空间电荷密度, ϵ_B 为沟道层的介电常数, $n(x, y)$ 为沟道中电子浓度, N_{DB} 为施主浓度, N_m 为沟道中第 m 子能级上的二维电子气浓度, E_F 为费米能级. 在 GaAs 中, 电子速度 $v(x)$ 与电场 $E(x)$ 的关系由下式给出^[9,10]:

$$v(x) = \frac{\mu E(x) + v_s (E(x)/E_{th})^4}{1 + (E(x)/E_{th})^4},$$

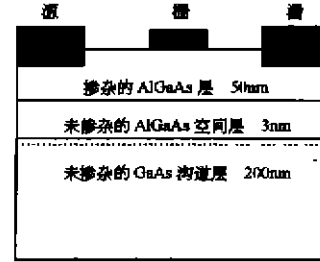


图 1 AlGaAs/GaAs HEMT 模拟用的结构图

Fig. 1 The structure of AlGaAs/GaAs HEMT in the simulation.

式(5)中 v_s 为饱和速度, μ 为低场迁移率, E_{th} 为阈值电场. 为了获得电场分布和沟道中的电子浓度分布, 自洽求解方程(1)~(4). 由于我们没有考虑量子阱中所有的量级, 所以把上述得到的电子浓度与体系统得到的电子浓度叠加就是沟道中的电子浓度, 体系统的电子浓度表示为^[11]:

$$n_{bulk} = N_c \exp\left(-\frac{E_1 - E_F}{k_b T}\right), \quad (6)$$

式(6)中 N_c 为 GaAs 中的态密度.

薛定谔方程和泊松方程用有限差分法分离, 空间网格划分为非均匀的, 考虑到界面处的电子浓度变化较大, 所以界面附近的网格划分较小而且较密. 分离的薛定谔方程和泊松方程用超松弛迭代法自洽求解.

2 结果和讨论

不同栅压下 AlGaAs/GaAs HEMT 沟道中电子浓度的分布见图 2, 由图 2 可见, 二维电子气大部分是被限制在 10nm 范围的三角势阱中, 量子阱外离界面 20nm 的地方电子浓度已经非常小, 离界面 40nm 的地方电子浓度降低到体系统的浓度, 即 $1.0 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ 数量级. 这是由于在纵向方向高掺杂 AlGaAs 层中的电子转移到异质界面 GaAs 层一侧, 所以电子主要限制在 AlGaAs/GaAs 异质界面的 GaAs 量子阱中. 在横向方向, GaAs 沟道中的电子浓度分布是非均匀的, 栅下面沟道中的电子浓度受到栅电压的控制. 图 2(a) 和 (b) 中的栅压分别为 0V 和 -0.4V, 漏电压都为 1.0V. 图 2(a) 为零栅压下沟道中的电子浓度, 由于栅肖特基势垒的存在, 加漏电压时栅极下面的耗尽宽度不同, 所以, 沟道中的电子分布是不均匀的. 当加栅压时, 在图 2(b) 中可以看到沟道中的电子分布发生变化, 并且栅下面的电子浓度减小, 这是由于加栅压时栅下面的耗尽区宽度增加, 继续增加栅压会使栅下面的电子浓度进一步减小直到为零, 也就是说栅下面的二维电子气沟道被夹断, 这时漏电流变为 0.

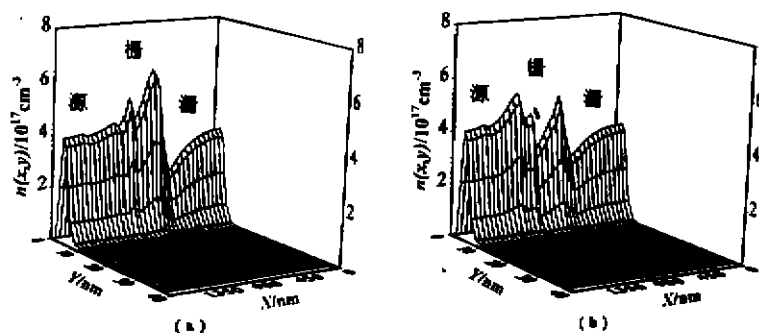


图 2 AlGaAs/GaAs HEMT 未掺杂层 GaAs 沟道中电子浓度的分布.
(a) 0.0V (b) -0.4V

Fig. 2 The distribution of electron concentration in the undoped GaAs channel of AlGaAs/GaAs HEMT

在图 3(a) 中我们给出了 GaAs 沟道中的横向电场分布, 我们的结果与 Duke H. Park^[12]

等人和 Ki Wook Kin^[13]等人用蒙特-卡罗方法一维沟道方向的结果是一致的,由此获得了进一步的二维结果. 横向电场沿沟道方向在栅极两边出现一大一小的两个峰值,由于栅漏之间的电势变化很大,所以出现了较大的电场峰值. 图 3(a) $V_{gs}=0.0V$ 和图 3(b) $V_{gs}=-0.4V$ 中同时可以观察到在纵向离开界面指向衬底的横向电场变化较小,这是由于二维电子气主要分布在沟道量子阱中,阱外的电子浓度非常小而且变化不大. 图 3(b)为加栅压时的电场分布,可以看到源栅之间的电场增加,栅漏之间的电场减小,这可以从图 2(b)中加栅压时的电子浓度分布得到解释. 由于加栅压时源栅之间的电子浓度增加,所以导致电场增加. 由于加栅压后电场增加,这将导致沟道中的电子迁移率下降,因为电子在高场中运动受到的晶格散射增加,由速度与电场的关系式(5)知道电子运动速度并不因电场的增加而增加,而是把增加的能量交给了晶格,从而使电子的迁移率下降,电子的运动速度在源栅之间也达到饱和. 因此,当加负栅压时 HEMT 器件的跨导将会降低. 这就从理论上解释了栅压增加时 HEMT 器件跨导降低的实验结果^[14~16].

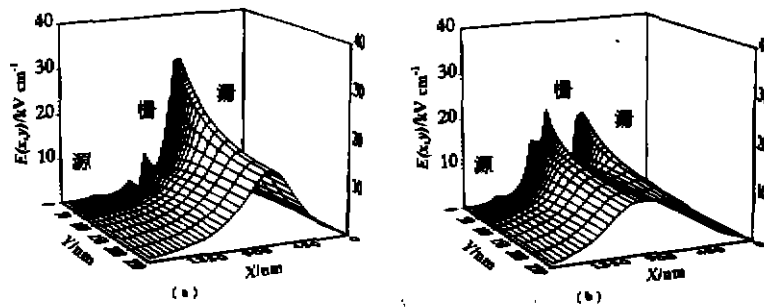


图3 AlGaAs/GaAs HEMT 沟道层中的二维横向电场分布
(a)0.0V (b)-0.4V

Fig. 3 The distribution of two-dimensional transverse electric field in the channel for AlGaAs/GaAs HEMT

3 结论

应用二维数值模型同时考虑自洽求解薛定谔方程和泊松方程成功地模拟了毫米波 AlGaAs/GaAs HEMT 器件的物理特性. 模拟获得了器件沟道中的二维电子浓度和电场. 分析表明加栅压时栅下面沟道中的二维电子浓度减小, GaAs 沟道中源栅之间的横向电场增加, 导致沟道电子迁移率的降低, 从而引起 HEMT 器件跨导变小.

致谢 本工作中, 何乃明、陈定钦和夏永伟三位副研究员与作者在数值计算方面进行了有益的讨论, 在此表示十分感谢.

参考文献

- 1 Saunier P. *IEEE Electron Device Lett.*, 1986, EDL-7(9), 503
- 2 Delagebeaudeuf D, Linh N T. *IEEE Trans Electron Devices*, 1982, 29(6):955
- 3 Lee K, et al. *J. Appl. Phys.*, 1983, 54(11): 6432

- 4 Shey A J, Ku W H. *IEEE Electron Device Lett.*, 1988, **9**(12): 624
- 5 Loret D, et al. *Simulation of Semiconductor Devices and Processes, Vol. 2, Edited by K. Board, D. R. J. Owen. Pineridge Press, Swansea, U. K.*, 1986: 100
- 6 Selberherr S. *Analysis and Simulation of Semiconductor Devices*. Springer-Verlag, Wien, New York, 1984, 141
- 7 Yokoyama K, Hess K. *Phys. Rev.*, **B33**(8): 5595
- 8 Drury R, Snowden C M. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1995, **42**(6): 1026
- 9 Yokoyama K, Sakaki H. *IEEE Electron Device Lett.*, 1987, **EDL-8**(2): 73
- 10 Thim H W. *J. Appl. Phys.*, 1968, **39**(8): 3897
- 11 Widiger D J, et al. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1985, **32**(6): 1092
- 12 Park D H, Brennan K F. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1990, **37**(3): 618
- 13 Kim K W, et al. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1991, **38**(8): 1737
- 14 Loret D. *Solid-State Electronics*, 1987, **30**(11): 1197
- 15 Zhou J R, Ferry D K. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1993, **40**(2): 421
- 16 Ahn H, Nokali M E. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1994, **41**(6): 874

TWO-DIMENSIONAL NUMERICAL SIMULATION OF MILLIMETER-WAVE HIGH ELECTRON MOBILITY TRANSISTOR

Zhang Xinghong Yang Yufen Wang Zhanguo

(Laboratory of Semiconductor Materials Science, Institute of Semiconductors,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract A two-dimensional numerical model was presented for the high electron mobility transistor (HEMT). The physical properties of two-dimensional electron gas in the quantum well of the GaAs channel layer for AlGaAs/GaAs HEMT were discussed by using the two-dimensional numerical simulation. The electron concentration and the electric field in the channel were obtained by solving the Schrödinger's and Poisson's equations self-consistently. The simulation results show that the transconductance of HEMT changes obviously with the voltage of gate.

Key words two-dimensional numerical simulation, two-dimensional electron gas, channel, transconductance.