

AIGaAs/GaAs HEMT 中界面态对沟道层电场特性影响的二维数值研究

张兴宏¹ 杨玉芬² 王占国¹

(1 中国科学院半导体研究所 半导体材料科学实验室 北京 100083)

(2 中国科学院半导体研究所 微电子技术研究发展中心 北京 100083)

摘要 本文建立了 AIGaAs/GaAs HEMT 的二维量子模型, 这个模型是基于在 GaAs 沟道中用自洽求解薛定谔方程和泊松方程 用二维数值模拟得到了 HEMT 沟道中横向电场和纵向电场的二维分布, 详细研究了不同固定界面态密度对沟道中横向电场和纵向电场的影响

EEACC: 2560S, 2530N

1 引言

自从 1980 年第一支高电子迁移率晶体管 (HEMT) 被日本富士通的 T. Minura 等人^[1] 发明以后, HEMT 以其优越的微波和超高速性能在高频微电子领域得到很快的发展^[2]. 由于采用了调制掺杂技术, HEMT 沟道中的电子有较高的迁移率, 所以 HEMT 比传统的 MESFET 器件具有更为优越的性能 但是由于 MBE 生长工艺和生长参数 (如生长温度和生长速度等) 的影响, 异质结中总存在界面态, 使异质结器件 (如高电子迁移率晶体管和异质结双极晶体管) 的性能受到限制 对 AIGaAs/GaAs HEMT, 二维电子气存在于 AIGaAs/GaAs 异质界面未掺杂 GaAs 层的三角势阱中, 所以电子在势阱中运动必然受到界面态的作用 在半导体异质结中界面态的存在很早就被 W. Goldham 和 A. Gilnes 发现^[3], 后来有不少的作者用间接的方法对界面态密度进行了测量, 得到的数量级在 $8.0 \times 10^{10} \sim 1.3 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ 的范围^[4~6]. 界面态的存在不仅影响界面的能带图, 而且还影响半导体异质结的某些电学性质, 其密度的大小依赖于生长工艺和样品的质量, 而且还与温度有关 研究发现电子的迁移率随着界面态密度的增加而减小^[7]. 因此, 研究界面态对 HEMT 器件性能的影响是有意义的

本文用二维数值模拟的方法研究了固定界面态对 AIGaAs/GaAs HEMT 沟道中电场的影响, 用自洽求解薛定谔方程和泊松方程获得了沟道层中的横向和纵向电场分布, 讨论了不同界面态密度对电场的影响

张兴宏 男, 1966 年出生, 博士生, 目前主要从事半导体材料和器件物理研究

杨玉芬 男, 1938 年出生, 研究员, 主要从事半导体微波器件研究

王占国 男, 1938 年出生, 中国科学院院士, 主要从事半导体材料物理研究

1996-12-25 收到, 1997-03-28 定稿

2 二维数值模型

2.1 HEMT 的二维量子模型

由 AlGaAs 掺杂层转移到界面 GaAs 一侧势阱中的电子被限制在 HEMT 二维沟道中运动, 考虑量子阱中电子能量的量子化以及电子在纵向方向的空间扩展, 量子阱中的电子态同时满足薛定谔方程和泊松方程:

$$-\frac{\hbar^2}{2m^*} \times \frac{d^2 \chi_n(y)}{dy^2} + [\Delta E_c - eV(x, y)] \chi_n(y) = E_n \chi_n(y) \quad (1)$$

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

$$\rho_B = q(N_{DB} - N_{AB}) - q \sum_{n=2}^n N_n |\chi_n(y)|^2 \quad (3)$$

$$N_n = \frac{m^* k_b T}{\pi \hbar} \ln \left[1 + \exp \left(\frac{E_F - E_n}{k_b T} \right) \right] \quad (4)$$

式中 x 为沟道方向(横向); y 是从异质界面指向衬底方向(纵向); $\chi_n(y)$ 是与本征能量 E_n 相应的波函数; ΔE_c 是导带不连续的值(模拟中 Al 的组份为 0.3, ΔE_c 的值为 0.32); $V(x, y)$ 是静电势; $\rho_B(x, y)$ 为沟道中空间电荷密度; ϵ_B 为沟道层的介电常数; N_{DB} 和 N_{AB} 分别为沟道中施主和受主浓度; N_n 为沟道中第 n 子能级二维电子气的浓度; E_F 为费米能级 横向和纵向电场分别由 $E(x) = dV(x, y)/dx$ 和 $E(y) = dV(x, y)/dy$ 给出 为了获得沟道中的电场分布, 需要自洽求解方程(1)~(4). 在本文的模拟中我们仅考虑量子阱中第一能级

2.2 AlGaAs/GaAs 异质界面的界面态

如果我们假设界面态存在于 AlGaAs/GaAs 异质界面, 则固定界面态密度满足下列条件: 垂直于界面方向的电位移差等于界面电荷,

$$\epsilon_A \frac{dV(x, y)}{dy} \Big|_{\text{int}_-} - \epsilon_B \frac{dV(x, y)}{dy} \Big|_{\text{int}_+} = qN_{ss} \quad (5)$$

其中 N_{ss} 为固定界面态密度; ϵ_A 和 ϵ_B 分别是 AlGaAs 和 GaAs 的介电常数 存在于 AlGaAs/GaAs 的界面态属于局域态, 界面态在异质界面的禁带中呈现 U 形分布^[8], 这些态可能由界面粗糙度和界面晶格失配引起, 也可能由界面处 As 空位引起^[7]. 在低频下界面态自身表现为一定的电容效应, AlGaAs/GaAs HEMT 中当栅压改变时界面态的填充情况要发生变化, 界面态只能通过和能带交换电子才能实现充放电, 有较长的充放电时间常数 在高频下界面态对 HEMT 的 $C-V$ 特性也有影响^[9]. 在 HEMT 中界面态密度是栅压的函数^[4], 本征界面态是与栅压无关的而是与材料本身有关的, 我们认为本征界面态密度大小是由异质界面的悬挂键密度和晶格失配度决定的 非本征界面态密度是由异质界面的缺陷密度决定的 我们把本征界面态和非本征界面态统称为固定界面态, 其大小由两者决定 虽然界面态密度可以从低频 $C-V$ 特性和高频电导法测量, 但是这些测量方法并不能真实地反映界面态密度的大小, 因为这两种测量方法是基于界面态的电容效应, 而测量中的电容并不仅仅是界面态的贡献, 还包括其它因素引起的电容变化 本文仅讨论 AlGaAs/GaAs 界面处固定界面态对 HEMT 沟道电场的影响 关于栅压变化对界面态的影响在另一篇文章已给予讨论^[10].

2.3 数值方法

上述器件方程的解满足的边界条件为: 电子的波函数在 GaAs 衬底和掺杂的 AlGaAs 层中为零, 源漏和栅极的电势为给定的值, 其它边界满足垂直于表面方向的电场为零 AlGaAs/GaAs 界面满足界面方程(5). 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, 纵向方向网格大小的变化从 1mm 到 40nm, 横向方向网格大小的变化从

10nm 到 80nm, 考虑到界面处的电子浓度变化较大, 所以界面附近的网格较小而且较密, 分离的薛定谔方程和泊松方程用超松弛迭代法自洽求解

3 结果和讨论

用于 AlGaAs/GaAs HEMT 模拟的结构见图 1. 图中 AlGaAs 掺杂层的浓度为 $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 栅极的势垒高度为 0.8eV, 虚线表示二维电子气的位置, 坐标和结构参数在图中给出. 源漏和栅极在掺杂的 AlGaAs 层上, 实际上欧姆结是形成在高掺杂的 GaAs 顶层上作为源和漏极. 通过二维数值模拟我们获得了 AlGaAs/GaAs HEMT 沟道层中横向和纵向电场的二维分布. 图 2 和图 3 分别给出了不同固定界面态密度时的横向电场分布和纵向电场分布, 图中给出的是电场三维分布的二维投影图, 图上所标等

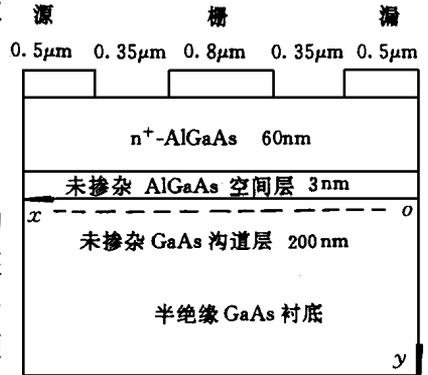


图 1 AlGaAs/GaAs HEMT 模拟用的基本结构图

时的横向电场分布和纵向电场分布, 图中给出的是电场三维分布的二维投影图, 图上所标等

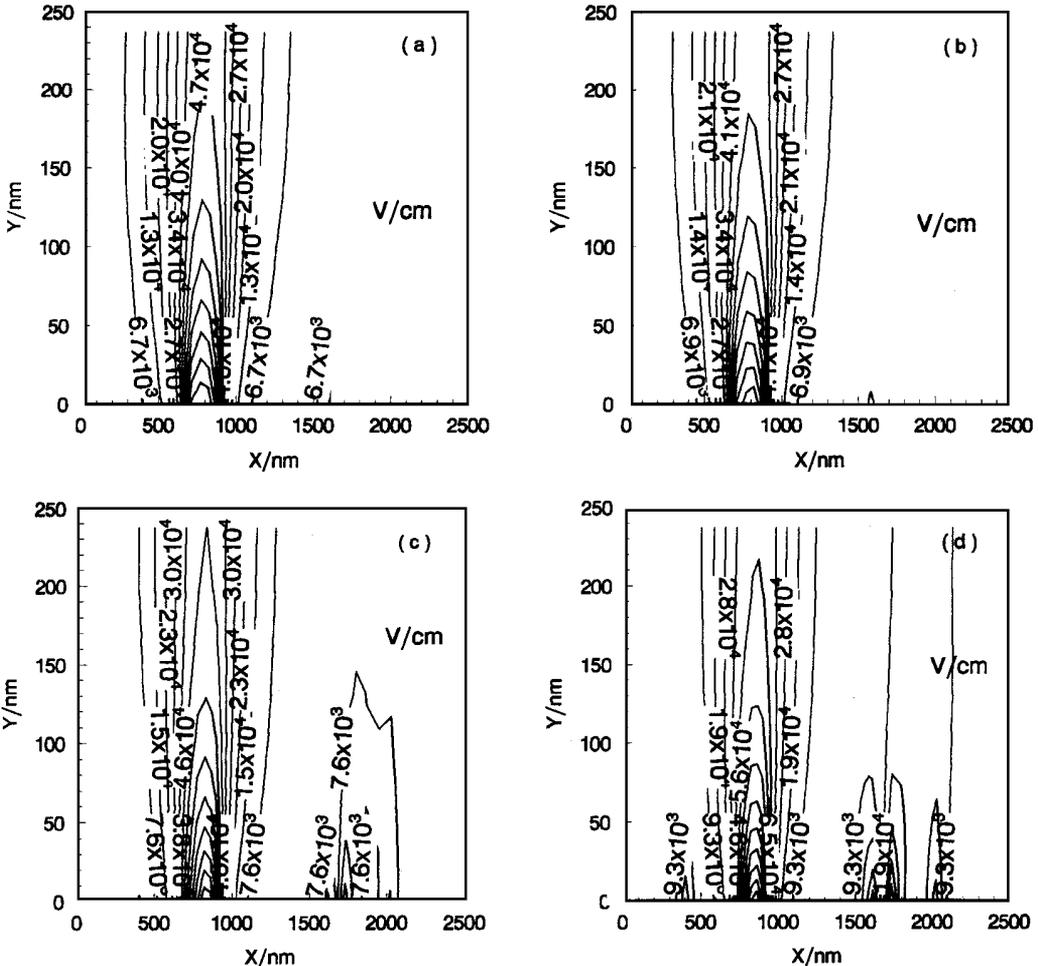


图 2 不同固定界面态密度时 AlGaAs/GaAs HEMT 沟道中的横向电场分布

值线的值为电场,其单位是 V/cm ,等值线密的地方表示电场变化较大,疏的地方表示电场变化较小.漏电压为 $v_{ds} = 3.0V$,栅电压为 $v_{gs} = 0.0V$,固定界面态密度分别为(a) $0.0cm^{-2}$,(b) $1.0 \times 10^{11}cm^{-2}$,(c) $5.0 \times 10^{11}cm^{-2}$,(d) $1.0 \times 10^{12}cm^{-2}$.图2和图3中 $Y = 0$ 处为 $AlGaAs/GaAs$ 界面, $X = 0$ 处为漏端.从图2可以看出固定界面态密度较小时(图2(b))横向电场与不考虑界面态时的横向电场(图2(a))相比变化不大.当固定界面态密度增加时如图2(c)和(d),在离界面 $100nm$ 范围的 $GaAs$ 沟道中栅漏之间和源栅之间的横向电场明显增加,我们认为这是因为固定界面态上的局域电荷引起的.图3可以看出固定界面态密度较小

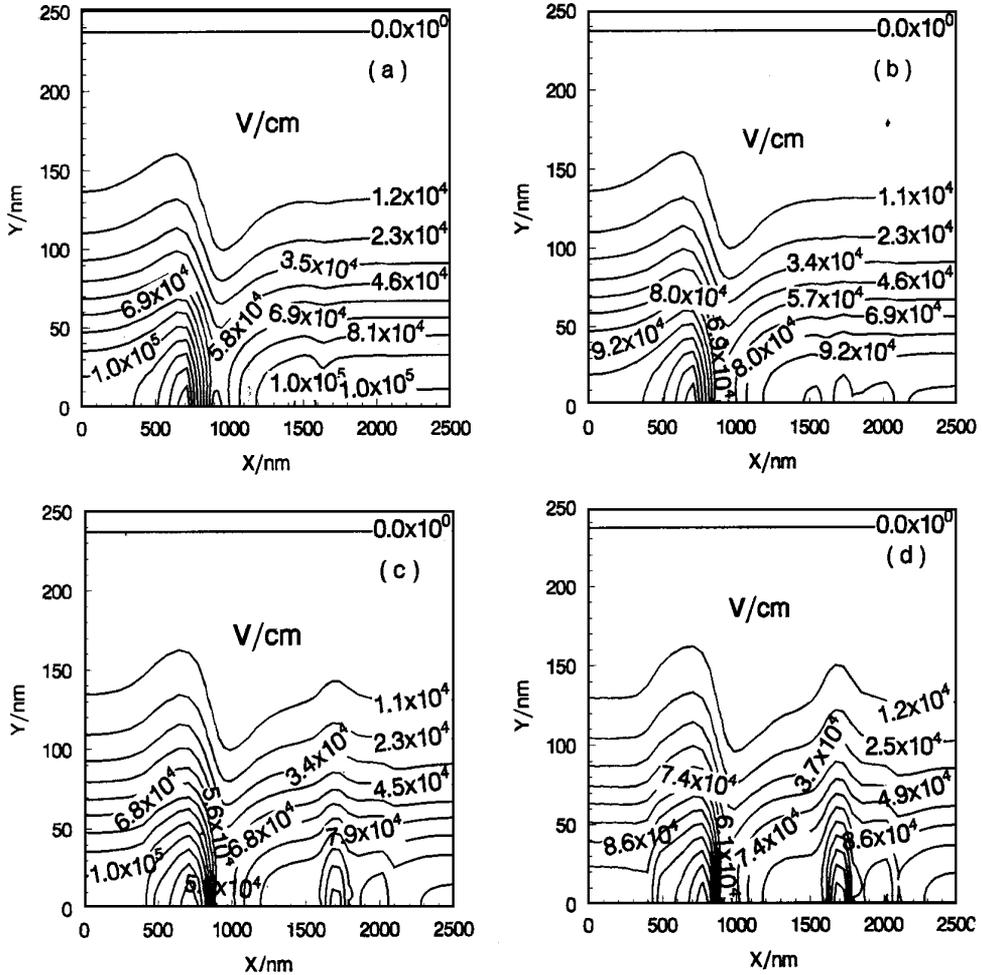


图3 不同固定界面态密度时 $AlGaAs/GaAs$ HEMT 沟道中的纵向电场分布

栅压为 $0.0V$,漏压为 $3.0V$,界面态密度同图3

时纵向电场变化不大,当固定界面态密度增大时纵向电场分布发生较大的变化.图3还可以看出纵向电场在离界面 $150nm$ 以外的地方电场变化很小,这是由于二维电子主要分布在界面附近的量子阱中.不同固定界面态密度沟道方向的电场在图4显示,固定界面态密度为零时横向电场的结果与Duke H. Park等人^[11]和KiWook Kim等人^[12]用蒙特-卡罗方法一维沟道方向的结果是一致的.图4中可以看出栅漏之间和源栅之间的电场随界面态密度的增

加而增加,且当界面态密度小于 $1.0 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 时界面态对电场的影响很小。当界面态密度较大时,在栅漏之间和源栅之间的横向电场还出现多个峰值,这是由于界面态上的陷阱电荷改变了沟道中电子的分布。另外栅漏之间的电场有一较大的峰值是因为栅漏之间的电势变化较大,界面态密度增加时,峰值向栅极方向有较小的移动,这可能是栅极肖特基势垒和界面态上的陷阱电子以及沟道中的电子相互作用引起的。图 5 为不同固定界面态密度对栅下面沟道中纵向方向电场的影响,图中显示界面附近的纵向电场随着界面态密度的增加而减小,离界面 25nm 以外界面态对纵向电场的影响较小。图 5 中的插图清楚地显示了界面附近 25nm 范围内的沟道中不同界面态密度对纵向电场的影响。由于界面态是分布在界面,所以界面态对纵向电场的影响主要在界面附近。

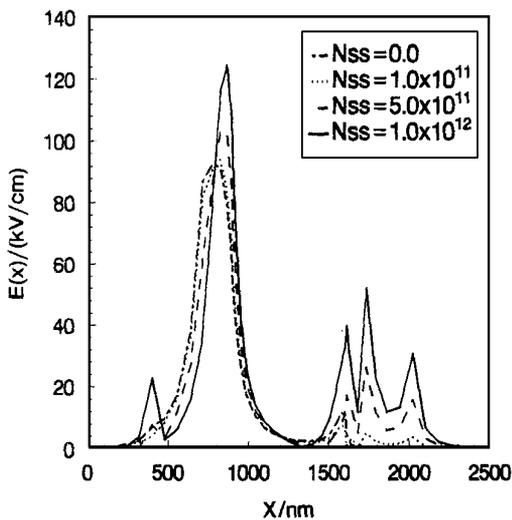


图 4 A lGaAs/GaAs HEMT 不同固定界面态密度沟道方向的电场
栅压和漏压以及界面态密度同图 2

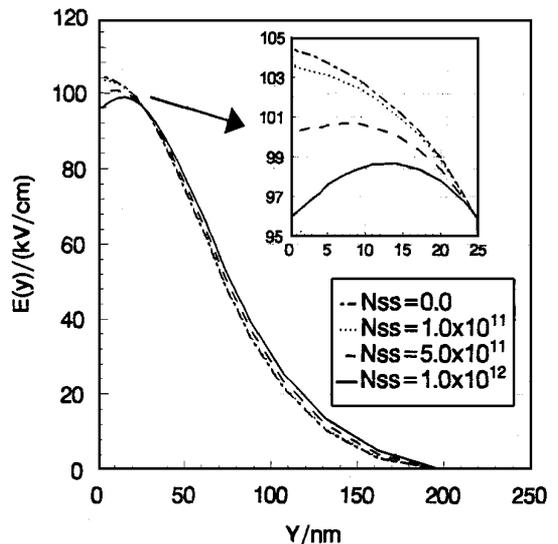


图 5 A lGaAs/GaAs HEMT 不同固定界面态密度栅下面沟道中纵向电场
栅压和漏压以及界面态密度同图 2

上述的结果可以看出由于界面态的存在,沟道中的电场将发生变化,在沟道方向电场随界面态密度的增加而增加。电子在高电场中受到的晶格散射增加,使沟道中电子的迁移率降低,另一方面界面态还会形成散射中心也会降低电子的迁移率,从而降低了 HEMT 器件的跨导。界面态非常大时还会导致钉扎效应,使栅极对二维电子气的控制能力降低,这样 HEMT 的性能变差。HEMT 器件 $I-V$ 输出的弯曲效应(kink effect)可能与界面态也有关,界面态还可能影响 HEMT 器件的噪声性能。

4 结论

二维数值模拟结果表明当固定界面态大于 $1.0 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 时,对 A lGaAs/GaAs HEMT 沟道层中的电场有较明显的影响。界面态的存在使沟道中的电场分布和大小发生变化,特别是当界面态密度与器件沟道中二维电子密度有相同的数量级时界面态对电场影响较为明显,从而界面态的存在对 HEMT 器件的性能产生影响。

参 考 文 献

- [1] T. Mi nura *et al* , Jpn J. Appl Phys , 1980, **19**: L225
[2] M. Abe *et al* , IEEE Trans Electron Devices, 1989, **ED-36**: 2021.
[3] W. G. Oldham and A. G. Milnes, Solid-State Electron , 1964, **7**: 153
[4] S. Chung *et al* , IEEE Trans Electron Devices, 1987, **34**: 149
[5] K. Lee *et al* , J. Appl Phys , 1983, **54**: 6432
[6] H. Kroemer *et al* , Appl Phys Lett ,1980, **36**: 295
[7] H. Sibari *et al* , Semicond Sci Technol , 1996, **11**: 1002
[8] 赵冷柱,张希成,高等半导体物理,上海:华东师范大学出版社,1992: 349
[9] 叶良修,半导体物理学,上册,北京:高等教育出版社,1983: 379
[10] 张兴宏,杨玉芬,王占国,电子学报,(已接受).
[11] D. H. Park and K. F. Brennan, IEEE Trans Electron Devices, 1990, **37**: 618
[12] K. W. Kim *et al* , IEEE Trans Electron Devices, 1991, **38**: 1737.

Two-Dimensional Numerical Study on Influence of Interface States on Electric Field in Channel of AlGaAs/GaAs HEMT

Zhang Xinghong, Yang Yufen and Wang Zhanguo

(*Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083*)

Received 25 December 1996, revised manuscript received 28 March 1997

Abstract A two-dimensional quantum model based on the self-consistent solution of Schrodinger's and Poisson's equation is presented for AlGaAs/GaAs HEMT. The distributions of transverse and longitudinal electric field in the channel of HEMT are obtained from two dimensional numerical simulation. The influences of different interface state density on the transverse and longitudinal electric field in the channel of HEMT are studied in detail.

EEACC: 2556S, 2530N