

平面掺杂异质结场效应管的二维电子气浓度和材料结构尺寸之间的关系*

李效白

(专用集成电路国家重点实验室 电子工业部十三所 石家庄 050051)

摘要 本文对场效应管所用材料的隔离层、 δ 调制掺杂层、势垒耗尽层等材料结构尺寸, 异质结界面的二维电子气浓度、场效应管的夹断电压、沟道电流等以及它们之间的关系进行了计算分析, 可作为材料和器件结构设计的依据

EEACC: 2560R, 2560S; PACC: 0530, 7145

1 引言

Anderson 等人在 30 多年以前已经提出异质结界面上会出现电子积累层和反型层, 1980 年首次报道了利用 AlGaAs/GaAs 做成的调制掺杂场效应晶体管 匹配的和匹配的异质结场效应管 (HEMT, PHEMT) 的最高振荡频率目前达到 500GHz, 功率 (Ku 波段, 芯片) 达到 20 瓦 它们的发展得益于材料结构的合理设计、生长设备和工艺技术的改进

已经有不少文献报道了异质结界面二维电子气 (2DEG) 的性质^[1,2], 计算了异质结的 2DEG 浓度^[3-6], 分析了场效应管的阈值电压、平行电导和沟道电流^[5,7], 其中对于均匀掺杂的 AlGaAs/GaAs 异质结 FET 做的工作比较多。

90 年代以来, 调制掺杂主要采用了 δ (或平面) 掺杂和原子层掺杂技术, 隔离层和异质结界面采用了各种组分和配比的化合物半导体材料, 从而使得 2DEG 浓度有了大幅度的提高, 电子迁移率受到兼顾或得到改善, 跨导从 200mS/mm 栅宽提高到 600mS/mm 栅宽, 甚至达到 1300mS/mm 栅宽

本文考虑了异质结场效应管肖特基势垒层为平面掺杂、平面掺杂层和异质结界面层间存在一个距离可改变的隔离层、异质结两边半导体由特定的选择所局限的一种结构, 对于这种情况研究了一定条件下的 2DEG 浓度与材料结构尺寸间的关系

* 专用集成电路国家重点实验室资助项目

李效白 男, 1941 年出生, 研究员, 从事砷化镓微波功率场效应管、化合物半导体器件和电路的物理和制造工艺研究
1998-01-04 收到, 1998-05-14 定稿

2 异质结两边半导体中泊松方程的解

在平衡情况下,金属-宽带隙半导体-窄带隙半导体结构的导带底的形状及势阱能级量子化的剖面见图 1.

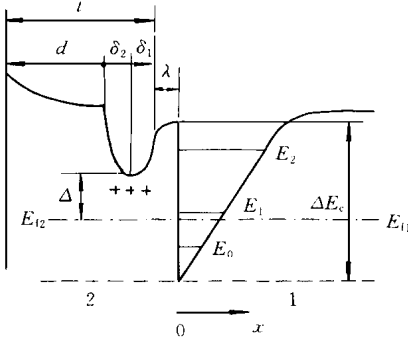


图 1 异质结场效应管能带剖面图

图中, δ 掺杂区域的尺寸被夸大了,它分成 δ_1 区域和 δ_2 区域, δ_1 区域用于提供 2DEG, δ_2 区域用于平衡肖特基势垒和栅外加偏压. 平面掺杂的形状为设定的数字模拟的形状,为分析简便,本文设为矩形. 若 N_d 为 δ 掺杂区的杂质浓度,在宽带隙半导体区域和平衡情况下,泊松方程和它的边界条件为:

$$\frac{d^2V}{dx^2} = - \frac{qn_2(x)}{\epsilon_0\epsilon_2} \tag{1}$$

$$n_2(x) = \begin{cases} 0 & \lambda < x < 0 \\ -N_d & -(\lambda + \delta_1 + \delta_2) < x < -\lambda \end{cases} \tag{2}$$

$$-\left(\frac{dV_2}{dx}\right) = \begin{cases} \xi_{20} & x = 0 \\ 0 & x = -(\lambda + \delta_1) \end{cases} \tag{3}$$

$$V_2 = \begin{cases} V_{20} & x = 0 \\ 0 & x = -(\lambda + \delta_1) \end{cases} \tag{4}$$

式中 ϵ_2 为宽带隙半导体的相对介电常数; $V_2(x)$ 为区域 2 内电势,以 $x = -(\lambda + \delta_1)$ 处电势值作参考零值; V_{20} 、 ξ_{20} 分别为宽、窄半导体界面处的电势和电场强度; $n_2(x)$ 为净电荷密度; λ 为隔离层厚度,隔离层可用与势垒层同质的材料,也可插入一层与势垒层、沟道层形成异质结的材料,以改善晶格匹配. 考虑到 λ 通常很小和镜像电场力的作用,可采用模拟曲线来近似隔离层导带底的形状. 本文分析的情况为同质材料.

对(1)式积分后可得:

$$\epsilon_0\epsilon_2\xi_{20} = q\delta_1N_d \tag{5}$$

$$-V_{20} = \frac{q\delta_1N_d}{\epsilon_0\epsilon_2} \left(\lambda + \frac{\delta_1}{2}\right) \tag{6}$$

设肖特基势垒区域在不外加栅偏压时,理想化的情况是宽带隙半导体刚好被耗尽,不存在平行电导效应,也不存在增强型场效应管的情况. 对于这种理想化的设计,解泊松方程可得到:

$$-V_{2m} = \frac{q\delta_1N_d}{\epsilon_0\epsilon_2} \left(d + \frac{\delta_1}{2}\right) \tag{7}$$

对于窄带隙半导体,泊松方程为:

$$\frac{d\xi_1}{dx} = \frac{qn_1(x)}{\epsilon_0\epsilon_1} \tag{8}$$

边界条件为:

$$\xi_1 = \begin{cases} \xi_{10} & x = 0 \\ 0 & x = \end{cases} \quad (9)$$

式中 $\xi_1(x)$ 为区域 1 内电场强度; ξ_{10} 为界面处电场强度; $n_1(x)$ 为区域 1 内净电荷密度 考虑到势阱中 2DEG 面密度为 n_s , 积分得到:

$$\epsilon_0 \epsilon_1 \xi_{10} = q n_s \quad (10)$$

由界面上电场连续性条件可得到:

$$\epsilon_0 \epsilon_1 \xi_{10} = \epsilon_0 \epsilon_2 \xi_{20} = q n_s \quad (11)$$

3 纵向量子化势阱中的 2DEG 浓度

异质结界面两边的材料决定了势阱的宽度和深度, 势阱越宽越深, 尺寸量子化而产生的分立能级越多, 在一定条件下能容纳 2DEG 也越多. 势阱形式多样, 其中方形和三角形最为简单, 对材料和器件模拟比较适合. 当有效质量近似成立, 并可视为各向同性, 而且电子的能量不太高时, 可通过解薛定谔方程求得垂直于界面方向的波函数和能量本征值. 显然, 电子能级与阱深和电场强度密切相关, 还与方形势阱的宽度有关. 此外, 能级还与掺杂、介电常数和晶格失配有关(这点本文没有考虑). 计算程序和分析局限在方形和三角形势阱形状. 以后者为例, 三角形势阱中的离散能量可由下面的公式近似:

$$E_n = \left(\frac{\hbar}{2m^*}\right)^{1/3} \left(\frac{3}{2}\pi q \xi_{10}\right)^{2/3} \left(n + \frac{3}{4}\right) + \dots \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (12)$$

势阱中, 2DEG 系统中一种自旋的量子化态密度 D_i 与能级能量无关, 且是个常数, 脚标 i 为大于等于零的整数:

$$D_i = \begin{cases} \frac{qm^*}{\pi\hbar^2} & \text{电子能量 } E_i \\ 0 & \text{电子能量} < E_i \end{cases} \quad (13)$$

利用(10)式可将(12)式中的 ξ_{10} 用 n_s 代替. 2DEG 面密度 n_s 作为费米能级位置和温度的函数, 可由费米-狄拉克统计求出:

$$f(E_f - E_i) = \frac{1}{1 + g \exp[(E_i - E_f)/kT]} \quad (14)$$

在 $E_i = E_f$ 时, 式中 $g = 1$, 在其余情况下, $g = 1/2$

$$n_{s1} = \sum_{i=0} n_i = \sum_{i=0} D_i \int_{E_i}^{E_{i+1}} f(E_f - E_i) dE_i \quad (15)$$

由(5)、(11)式可以得到:

$$n_{s0} = \left(\frac{2\epsilon_0\epsilon_2 N_d V_{20}}{q} + \lambda^2 N_d^2\right)^{1/2} - N_d \quad (16)$$

由图 2 可看出费米能级的位置:

$$E_f = \Delta E_c - V_{20} - \Delta \quad (17)$$

从(15)式和(16)分别式得到的 n_{s1} 和 n_{s0} 应当是自恰的, 都等于 n_s , 自恰可由改变费米能级 E_f 的位置(平衡过程)来求得, 求解过程可由迭代法计算程序来实现

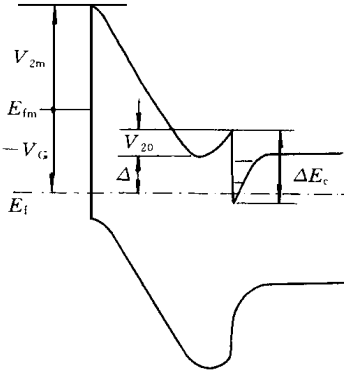


图 2 电压参数之间的关系

4 场效应管的夹断电压和沟道电流

当图 1 中 d, δ_1, N_d 取值刚好时, 沟道的开启电压为 0, 否则开启电压要么大于 0, 要么小于 0 对于普遍的情况, 可定义 δ 掺杂层的耗尽层电压为 V_p , 它可由泊松方程从 $-(t + \lambda)$ 到 $-\lambda$ 积分求得:

$$V_p = \frac{qN_d(\delta_1 + \delta_2)}{\epsilon_0\epsilon_2} (d + (\delta_1 + \delta_2)/2) \quad (18)$$

由图 2 可见, 金属-半导体界面至异质结界面的电势差等于 $(V_{2m} - V_G) - (\Delta E_c - E_s)$, 也等于泊松方程沿导带底的积分, 对电荷的积分得到 V_p , 对界面电场的积分为 $\xi_{20}(t + \lambda)$, 方向相反 因此有:

$$V_p - \xi_{20}(\lambda + t) = (V_{2m} - V_G) - (\Delta E_c - E_f) \quad (19)$$

和(11)式联立得到:

$$qn_s = \frac{\epsilon_0\epsilon_2}{t + \lambda} (V_G + V_{off}) \quad (20)$$

式中夹断电压 V_{off} 为 $qn_s = 0$ 时的栅电压 V_g :

$$V_{off} = V_{2m} - V_p + E_f - \Delta E_c \quad (21)$$

沟道电流 I_{ch} 为:

$$I_{ch} = qn_s z \beta v \quad (22)$$

式中 z 为场效应管的栅宽; β 为沟道导通因子:

$$\beta = 1 - \frac{0.02}{t} (l_g/n_s)^{1/2} \quad (23)$$

式中 l_g 为场效应管的栅长, v 采用了文献[7]中的速度电场特性, 这里不再赘述

5 计算结果

本文的计算分析, 以异质界面势阱中的 2DEG 面密度 n_s 为中心 n_s 是由势阱中分立的电子能级性质确定的, 电子在能级上的分布遵守费米-狄拉克统计, n_s 的大小与宽带隙半导体掺杂的浓度和位置有关, 它们之间的联系是由界面处的电场连续性建立起来的, 而电场和电荷分布可由泊松方程及其边界条件解得 文中将这些关系用公式表达出来, 并编出计算程序, 对计算结果进行了分析

通过程序, 由材料组成和结构参数 ($N_d, \delta_1, \delta_2, \lambda, d$) 可计算出 2DEG 面密度、夹断电压和沟道电流; 或者由已知的 2DEG 面密度、跨导等参数可导出材料组成和结构 计算得到的 2DEG 面密度 n_s 与隔离层厚度 λ 及 δ 掺杂浓度 N_d 之间的关系见图 3

图中 n_{s1} (实线) 和 n_{s2} (虚线) 分别对应 ΔE_c 为 0.3V 和 0.5V, (1)、(2)、(3)、(4) 分别对应 N_d 为 6×10^{17} 、 1.2×10^{18} 、 2.4×10^{18} 和 $4.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

从图中看出, 导带不连续性 ΔE_c 增加, 2DEG 浓度明显增加; 隔离层厚度 λ 减少, 2DEG 浓度增加 功率场效应管寄希望于 2DEG 浓度高的材料, 所以 λ 小、 ΔE_c 大是必要的, 但是 λ

太小由于库仑散射将引起迁移率明显地降低, 这是不希望的。掺杂浓度 N_d 对 2DEG 浓度也有较大的影响, 一般来说, N_d 越大, 2DEG 浓度越高。在 λ 较小时, 这种趋势更加明显。

计算还表明: 掺杂浓度高时, λ 在 5nm 之内变化对 2DEG 浓度有较大影响, 掺杂浓度低时, 或者 λ 超过 5nm 时, λ 的变化对 2DEG 浓度影响减弱; 在改善异质结材料结构以增加导带不连续性时, 要同时提高掺杂水平。因为掺杂水平低时, 即使导带不连续性大, 2DEG 浓度仍是低的,

只有提高掺杂浓度, 才能明显提高 2DEG 浓度; 随着 ΔE_c 增加, 阱中分立能级数目增加, 费米能级上升。 λ 减少时, 费米能级上升; λ 增加时, 分立能级数目呈增加趋势。

在 δ 掺杂的参数明确之后, 外延层的尺寸可以确定; 在 2DEG 浓度求出来以后, 从文中的公式可以方便的求出直流参数。

采用 $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}/\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ 材料制作 PHEMT, 隔离层厚 $\lambda = 3.5\text{nm}$, SMS 测试给出 $N_d = 2.166 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$, 薄层浓度测试给出 $2.18 \times 10^{12} \sim 3.15 \times 10^{12}\text{cm}^{-2}$, 每毫米栅宽芯片饱和沟道电流 I_{ch} 为 281~338mA, 相应的计算值为 $\Delta E_c = 0.319\text{V}$, $n_s = 3.49 \times 10^{12}\text{cm}^{-2}$, $I_{ch} = 366\text{mA}$, 与测试结果基本吻合。

6 结束语

分析计算表明, HEMT、PHEMT 外延材料的关键参数是 2DEG 面密度 n_s , 对于功率器件尤其如此。至今许多工作都在于力求: 不过分降低迁移率, 获得尽量高的 n_s 。这些工作可以归结为两个方面, 第一是改进材料结构, 提高 ΔE_c ; 第二是改进工艺和设计, 如采用 δ 掺杂工艺提高 N_d , 设计合理的材料结构(如 δ 掺杂位置、 λ 、 d 、 k 、 N_d 等等)。文中的分析和计算结果基本上回答了这些问题。

参 考 文 献

- [1] T. Ando, Phys. Rev. B, 1976, 13(8): 3468~3477.
- [2] T. Ando, A. B. Fowler and F. Stern, Rev. Mod. Phys., 1982, 54(2): 437~672.
- [3] Daniel Delagebeaudenf and Nugen T. Linh, IEEE Trans. Electron Devices, 1982, 29(6): 955~960.
- [4] Kwyyo Lee, Micheel Shar, Timothy J. Drummond *et al.*, J. Appl. Phys., 1983, 54(4): 2093~2096.
- [5] S. T. Lee, C. R. Crowell and C. P. Lee, IEDM, 1983, 103~106.
- [6] Frank Stern and Sarkar Das Sama, Phys. Rev. B, 1984, 30(2): 840~848.
- [7] Qincui Xia and M. El Nokali, Solid State Electron., 1990, 33(9): 1179~1187.

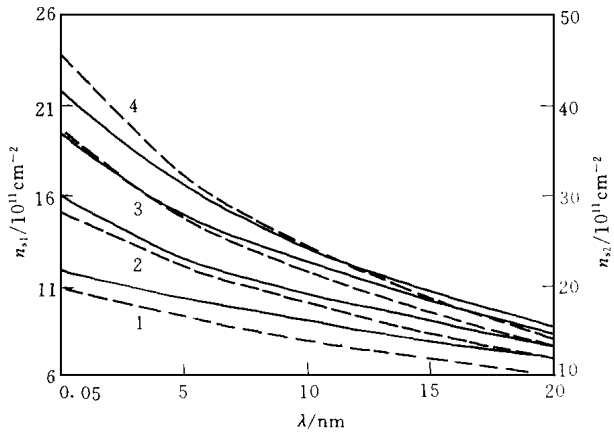


图 3 以 N_d 为参数, n_s 与 λ 之间的关系曲线

Relation Between Two-Dimensional Electron Gas Density and Structure Size of Material of Planar Doped Hetero-Junction FET

Li Xiaobai

*(National Laboratory for GaAs Integrated Circuits, The 13th Institute of
Ministry Electronic Industry, Shijiazhuang 050051)*

Received 4 January 1998, revised manuscript received 14 May 1998

Abstract The relation among structure size of material space layer, modulated doped layer, depleted barrier layer and two-dimensional gas density of heterostructure interface layer, pinch off voltage, channel current has been described. It is shown that the proposed expressions play an essential role in parameter design of material and device.

EEACC: 2560R, 2560S; **PACC:** 0530, 7145