

# 双异质结双平面掺杂HEMT器件的电荷控制模型

陈 震 刘新宇 吴德馨

(中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

**摘要:** 利用泊松方程以及异质结能带理论, 通过费米能级-二维电子气浓度的线性近似, 推导了基于双异质结双平面掺杂的HEMT器件的电荷控制模型。计算分析了沟道顶部和底部平面掺杂浓度, 栅金属与顶部平面掺杂层距离等材料结构尺寸和阈值电压、二维电子气浓度的关系。该模型为优化和预测双平面掺杂HEMT器件性能提供了一个有效手段。

**关键词:** 高电子迁移率晶体管(HEMT); 电荷控制模型; 异质结; 二维电子气; 双平面掺杂

**EEACC:** 1350A; 2560S

中图分类号: TN 385

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2004)07-0836-05

## 1 引言

高电子迁移率晶体管(HEMT)作为新一代微波及毫米波器件, 在频率、增益和效率方面表现出无与伦比的优势。近年来, 由于材料生长技术的进一步成熟以及单层与多层平面掺杂结构的采用, 材料的二维电子气特性有了很大的改进。在功率应用中, 往往需要采用双平面掺杂结构或者多沟道结构, 以进一步提高器件的二维电子气浓度, 从而提高输出电流。其中, 又以双异质结双平面掺杂的HEMT结构(DH-HEMT)应用最为广泛。

所谓电荷控制模型是在无漏极电压时, 栅压对二维电子气的调制作用。基于均匀掺杂的HEMT结构<sup>[1]</sup>和单平面掺杂的HEMT结构(SH-HEMT)的电荷控制模型已经有很多报道<sup>[2-4]</sup>。Cazaux等<sup>[5]</sup>报道了双异质结均匀掺杂的HEMT结构, 但是双异质结双平面掺杂的DH-HEMT的电荷控制模型目前仍然报道的较少, 并且需要繁琐的基于泊松、薛定谔方程的数值计算<sup>[6]</sup>。本文结合泊松方程和异质结能带理论, 通过一定的近似计算, 得到了双异质结双平面掺杂HEMT器件的电荷控制模型。

## 2 模型理论计算

### 2.1 双异质结双平面掺杂GaAs HEMT的能带结构

图1、图2分别给出了单平面掺杂的GaAs SH-HEMT以及双异质结双平面掺杂的GaAs DH-HEMT的导带能带图。由图中可以看出, GaAs SH-HEMT的导带在顶部异质结界面处形成一个三角形势阱, 而GaAs DH-HEMT在沟道两侧的异质结处各自形成一个三角形势阱, 在沟道厚度较小时, 也可近似认为形成一个方形势阱。

当沟道厚度( $d_w$ )较大时, 可近似认为在沟道中形成两个相对的三角形势阱。并可假设在两个三角形势阱中分别形成两组二维电子气, 浓度分别为 $n_{s1}$ (顶部)和 $n_{s2}$ (底部), 总的二维电子气浓度 $n_{st}$ 可看成两组二维电子气浓度之和, 即 $n_{st} = n_{s1} + n_{s2}$ 。

### 2.2 异质结方程的建立

所研究的器件具有典型的DH-HEMT外延结构, AlGaAs肖特基势垒层厚度为 $d$ , GaAs或In-GaAs沟道宽度为 $d_w$ , 沟道两侧分别是AlGaAs间隔

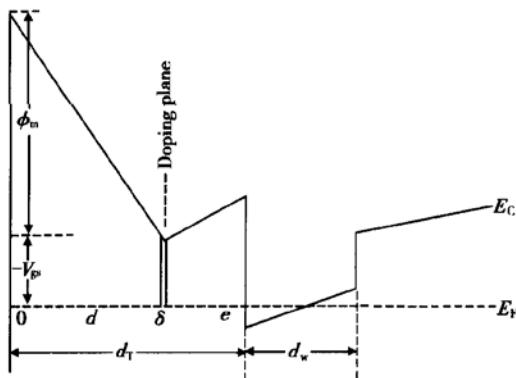


图1 单平面掺杂的GaAs HEMT 导带能带结构

Fig. 1 Schematic conduction band diagram of single planar doped GaAs HEMT

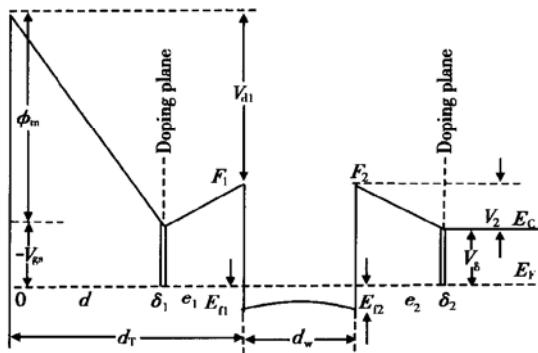


图2 双异质结双平面掺杂的GaAs HEMT 导带能带结构

Fig. 2 Schematic conduction band diagram of double heterojunction, double planar doped GaAs HEMT

层(厚度分别为 $e_1, e_2$ )和 $\delta$ 掺杂层( $\delta_1$ 和 $\delta_2$ )， $\delta$ 掺杂的厚度假设为1nm。 $F_1, F_2$ 分别为顶部和底部异质结界面处靠近AlGaAs侧的电场强度。当外加在栅上的负电压为 $V_{gs}$ 的时候，导带的能带结构如图2所示，其中费米能级在纵坐标为0的位置上。

从图2所示的顶部异质结的电场分布，可以列出顶部异质结方程：

$$V_{d1} = \Phi_m - V_{gs} - \Delta E_{c1} + E_{f1} \quad (1)$$

结合泊松方程，在 $x=0$ 和 $x=d_T$ 之间有：

$$V_{d1} = -F_1 d_T + V_{p1} \quad (2)$$

其中  $V_{p1} = \frac{qN_{\delta 1}}{\epsilon_1} \left[ d + \frac{\delta_1}{2} \right]$ ,  $F_1 = \frac{qn_{s1}}{\epsilon_1}$

根据图2，同样不难列出底部异质结方程：

$$V_2 = \Delta E_{c2} - E_{f2} - V_\delta \quad (3)$$

在 $x=d_T+d_w$ 和 $x=d_T+d_w+e_2+\delta_2$ 之间有：

$$V_2 = -F_2(\delta_2 + e_2) - V_{p2} \quad (4)$$

$$\text{其中 } V_{p2} = \frac{qN_{\delta 2}}{\epsilon_2} \left[ \frac{\delta_2}{2} \right], F_2 = -\frac{qn_{s2}}{\epsilon_2}$$

列出沟道内的泊松方程，将沟道上下的电场 $F_1, F_2$ 和二维电子气浓度联系起来

$$\epsilon_1 F_1 - \epsilon_2 F_2 = q(n_{s1} + n_{s2} + N_A d_w) \quad (5)$$

其中  $N_A$  是未掺杂沟道的背景受主浓度，近似为  $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 。

由(1)~(4)式分别解出 $F_1, F_2$ ，代入(5)式，并代入 $F_2 = -\frac{qN_{\delta 2}}{\epsilon_2}$ ，可得：

$$qn_{sT} = \frac{\epsilon_1}{d_T} [V_{gs} - \Phi_m + \Delta E_{c1} + V_{p1} - E_{f1} + \Delta E_{c2} +$$

$$V_{p2} - E_{f2} + V_k - \frac{qN_A d_w d_T}{\epsilon_1} - V_\delta] \quad (6)$$

$$\text{其中 } V_k = qN_{\delta 2} \left[ \frac{d_T}{\epsilon_1} - \frac{e_2}{\epsilon_2} \right]$$

费米能级 $E_{f1}, E_{f2}$ 是二维电子气密度的函数，严格的解需要通过自治求解泊松方程和薛定谔方程得到。自治计算指出，对于 $n_s > 5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ ， $E_f$ 随 $n_s$ 的变化为线性的关系<sup>[2]</sup>。一个典型的自治计算结果如图3所示。

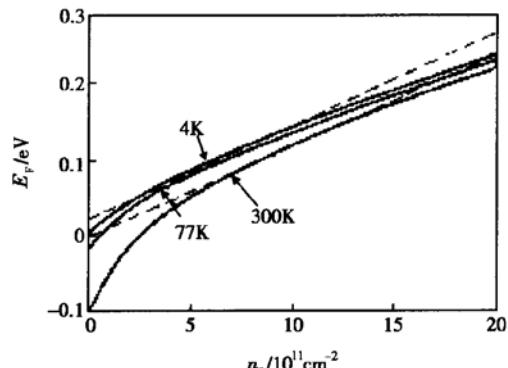


图3 不同温度下费米能级与2DEG密度关系

Fig. 3 Fermi level versus 2DEG density at different temperatures

近似情况下，可以认为 $E_f = E_{f0}(T) + an_s$ 。

对于AlGaAs/GaAs/AlGaAs结构， $a = 0.125 \times 10^{-16} \text{ V} \cdot \text{m}^2$ ， $T = 300 \text{ K}$ 时， $E_{f0}(T) = 0$ ；在77K以下 $E_{f0}(T) = 25 \text{ meV}$ 。

采用上述的线性近似后，可以得到300K时 $E_{f1} = an_{s1}$ ,  $E_{f2} = an_{s2}$ ，代入(6)式得到：

$$n_{sT} = \frac{\epsilon_1}{q(d_T + \Delta d)} (V_{gs} - V_{th}) \quad (7)$$

其中  $\Delta d = \frac{a\epsilon_1}{q}$

$$V_{th} = \phi_m - \Delta E_{c1} - V_{p1} - \Delta E_{c2} - V_{p2} - V_k + \frac{qN_A d_w d_T}{\epsilon_1} + V_\delta \quad (8)$$

(7) 式即为 DH-HEMT 器件的电荷控制模型.  $V_{th}$  即为 DH-HEMT 器件的阈值电压. (7) 和 (8) 式与文献[5]中报道的双异质结双均匀掺杂 DH-HEMT 的电荷控制模型具有类似的形式, 只是由于双平面掺杂的缘故, 导致了  $V_{p1}$ ,  $V_{p2}$  和  $V_k$  的函数表达式不同.

对于顶部 2DEG 浓度  $n_{s1}$ , 由(1)、(2)式可得:

$$qn_{s1} = \frac{\epsilon_1}{d_T} (V_{gs} - \phi_m + \Delta E_{c1} + V_{p1} - E_{fi}) \quad (9)$$

$$\begin{aligned} n_{s1} &= \frac{\epsilon_1}{q(d_T + \Delta d)} (V_{gs} - V_{th1}) \\ V_{th1} &= \phi_m - \Delta E_{c1} - V_{p1} \\ &= \phi_m - \Delta E_{c1} - \frac{qN_{s1}}{\epsilon_1} \left| d + \frac{\delta_1}{2} \right| \\ &\approx \phi_m - \Delta E_{c1} - \frac{qN_{s1}d}{\epsilon_1} \end{aligned} \quad (10)$$

(9) 和 (10) 分别是文献[3]中报道的单平面掺杂 HEMT 的电荷控制模型以及  $V_{th}$  的表达式.

底部的 2DEG 浓度为

$$n_{s2} = n_{sT} - n_{s1} \quad (11)$$

当底部  $\delta$  掺杂浓度足够高时, 底部的掺杂平面部分电离,  $V_\delta$  近似钉扎在  $0.01\text{eV}^{[7]}$ , 这已在自洽的数值计算结果中得到验证. 模型只适用于费米能级在底部平面掺杂层钉扎在一个固定值的情况下, 这需要忽略在底部  $\delta$  掺杂以外的区域的电势平衡.

### 3 结果和讨论

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  介电常数  $\epsilon(x) = (13.18 - 3.12x) \times \epsilon_0$ . 假设 DH-HEMT 沟道上下均为  $\text{Al}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As}$ , 即  $x = 0.24$ , 则  $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon(0.24) = 1.10 \times 10^{-12}\text{F/cm}$

对于  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  和  $\text{GaAs}$ ,  $\Delta E_{gg} = 1.247x$ .

当  $x < 0.45$  时, 禁带宽度差

$$\Delta E_g = \Delta E_{gg} = 1.247x$$

导带带系差

$$\begin{aligned} \Delta E_{c1} = \Delta E_{c2} &= \Delta E_c \approx 0.6\Delta E_g \\ &= 0.6\Delta E_{gg} = 0.6 \times 1.247 \times 0.24 = 0.18\text{eV} \\ \text{取 } \phi_m &= 1\text{V}, d_w = 12\text{nm}, e_1 = 2\text{nm}, e_2 = 4\text{nm} \end{aligned}$$

将上述常量代入(8)式, 计算出  $V_{th}$  和栅金属与顶部平面掺杂层距离  $d$  的关系如图 4、图 5 所示.

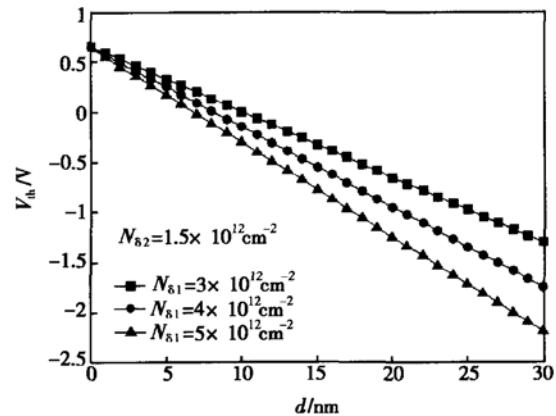


图 4  $N_{s2}$ 一定,  $N_{s1}$ 取不同值时  $V_{th}$  和  $d$  的关系

Fig. 4  $V_{th}$  versus  $d$  with different  $N_{s1}$  when  $N_{s2}$  is constant

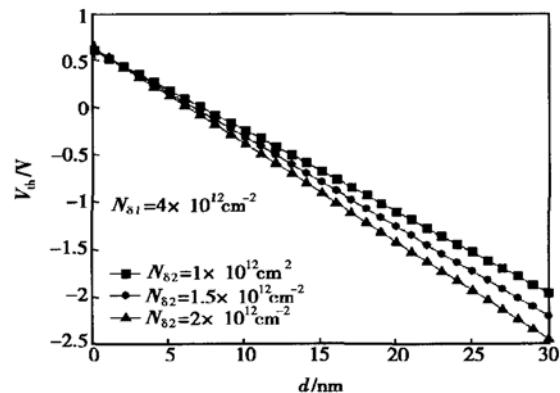


图 5  $N_{s1}$ 一定,  $N_{s2}$ 取不同值时  $V_{th}$  和  $d$  的关系

Fig. 5  $V_{th}$  versus  $d$  with different  $N_{s2}$  when  $N_{s1}$  is constant

由图 4 和图 5 可以看出, 随着  $d$  的增大, 阈值电压  $V_{th}$  减小, 而平面掺杂浓度  $N_{s1}$  或  $N_{s2}$  越大,  $V_{th}$  越小. 因此, 如果要设计增强型功率 PHEMT 器件, 需要较小的肖特基势垒层厚度和较低的平面掺杂浓度. 在进行栅槽腐蚀时, 增强型功率 PHEMT 一般需要较大的腐蚀深度, 使得栅金属离沟道更近, 这样才能在不加负栅压时就能把沟道耗尽.

图 6 给出了由(7)式计算出的 DH-HEMT 器件的二维电子气浓度和栅压  $V_{gs}$  的关系. 由图中可以看出, 在二维电子气浓度未达到饱和前, 当栅压  $V_{gs} < V_{th}$  时, 2DEG 浓度为 0, 即器件完全夹断; 当栅压  $V_{gs} > V_{th}$  时, 2DEG 浓度随着栅压增大而线性增加, 直

到达最大浓度。当 $d$ 较小时, 阈值电压较大(绝对值较小), 曲线的斜率较大, 即2DEG浓度随栅压 $V_{gs}$ 变化较快。由于输出电流与沟道中的2DEG浓度近似成线性关系, 因此 $d$ 较小时, 输出电流随栅压 $V_{gs}$ 变化较快, 即此时器件的跨导较大。实际上,  $d$ 越小时(即栅金属距离沟道越近), 栅控能力越强, 器件的阈值电压越大, 导致器件的跨导较大, 文献[3]中的模拟结果也说明了这一点。因此, 模型的结果与实际情况吻合。

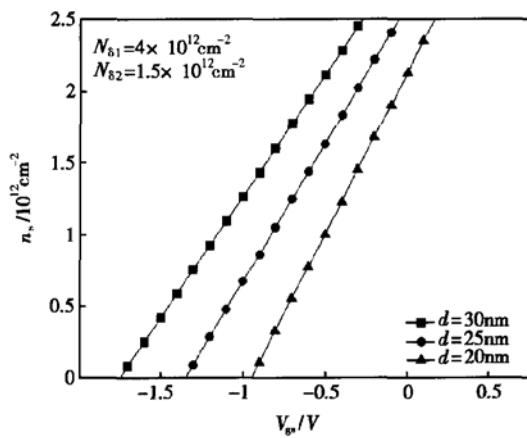


图6  $N_{s1}, N_{s2}$ 一定,  $d$ 取不同值时2DEG浓度和栅压 $V_{gs}$ 的关系

Fig. 6 2DEG density versus  $V_{gs}$  with different  $d$  when  $N_{s1}$  and  $N_{s2}$  are constant

## 4 结论

本文利用泊松方程以及异质结能带理论近似推导了基于双异质结双平面掺杂的HEMT器件的电

荷控制模型, 同时分析了沟道顶部和底部平面掺杂浓度, 栅金属与顶部平面掺杂层的距离等材料结构尺寸对阈值电压和二维电子气浓度的影响。对阈值电压的计算可以有助于改进材料结构, 帮助我们设计所需的增强型或耗尽型双异质结双平面掺杂HEMT器件。

## 参考文献

- [1] Delagebeaudeuf D, Linh N T, Metal-(n) AlGaAs-GaAs two-dimensional electron gas FET. IEEE Trans Electron Devices, 1982, 29(2): 955
- [2] Drummond T, Morkoc H, Lee K, et al. Model for modulation doped field effect transistor. IEEE Electron Device Lett, 1982, EDL-3(11): 338
- [3] Chao P C, Shur M S, Tiberio R C, et al. DC and microwave characteristics of sub-0.1-μm gate-length planar-doped pseudomorphic HEMT's. IEEE Trans Electron Devices, 1989, 36(3): 461
- [4] Li Xiaobai. Relation between two-dimensional electron gas density and structure size of material of planar doped heterojunction FET. Chinese Journal of Semiconductors, 1999, 20(5): 389(in Chinese)[李效白. 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. 半导体学报, 1999, 20(5): 389]
- [5] Cazaux J L, Ng G I, Pavlidis D, et al. An analytical approach to the capacitance-voltage characteristics of double-heterojunction HEMT's. IEEE Trans Electron Devices, 1988, 35(8): 1223
- [6] Inoue K, Sakaki H, Yoshino J, et al. Self-consistent calculation of electronic states in AlGaAs/GaAs/AlGaAs selectively doped double-heterojunction systems under electric fields. J Appl Phys, 1985, 58(11): 4277
- [7] Lien C H, Huang Y M, Chien H M, et al. Charge control model of the double delta-doped quantum-well field-effect transistor. IEEE Trans Electron Devices, 1994, 41(8): 1351

## An Analytical Charge Control Model of Double Planar Doped HEMTs

Chen Zhen, Liu Xinyu and Wu Dexin

(Compound Semiconductor Devices & Circuits Laboratory, Institute of Microelectronics,  
The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract:** By using linear  $E_F-n_s$ -approximation, a new analytical charge control model of the double heterojunction double planar doped high electron mobility transistor (HEMT) is deduced based on Poisson's equation. The heterojunction band theories, the relations among the doping concentration, the distance from the gate to the top planar doped plane and the pinchoff voltage, and the 2DEG density of the device are calculated and analyzed. The model provides a valuable tool for the optimization and performance prediction of the double planar doped HEMT.

**Key words:** HEMT; charge control model; heterojunction; 2DEG; double planar dope

**EEACC:** 1350A; 2560S

**Article ID:** 0253-4177(2004)07-0836-05