

AlGaAs/GaAs 异质结 2-DEG 的栅控特性和最佳掺杂

史常忻

(上海交通大学 应用物理系)

1983年4月22日收到

本文对 MISS (金属-绝缘层-AlGaAs-GaAs) 和 MES (金属-AlGaAs-GaAs) 结构异质结中二维电子气的栅控特性做了系统的理论分析。由此, 给出与器件性质密切相关的平带电压和异质结各参量间的关系。值得指出, 为了制造适宜于 LSI 中应用的增强型 FET, 应对 AlGaAs 进行最佳掺杂, 而不用通常的均匀掺杂。文中也给出了这一最佳掺杂条件。

一、引言

R. Dingle 等人^[1]首先在分子束外延生长的 AlGaAs/GaAs 异质结材料中观察到电子迁移率的提高。随后, 以该材料为基础各种结构的高电子迁移率晶体管 (HEMT), 亦称二维电子气场效应晶体管 (TEGFET) 相继出现。既有 MES 结构^[2,3,4], 也有 MISS 结构^[5]。不过它们多为耗尽型器件, 所以难以实现在大规模集成电路中的应用。

D. Delegebeaudeuf 等人^[6,7]考虑了能级分裂, 对 2-DEG 的电荷控制特性做了分析。而 T. Mimura^[8] 则用 Joyce-Dixon 近似^[9]处理了简并的 2-DEG。

本文基于 MISS 结构, 用费米积分计算了简并态的电子浓度, 得到 2-DEG 的栅控特性以及平带电压与异质结构各参量间的关系。由此, 给出了为制造增强型 FET 在 AlGaAs 中所需要的最佳掺杂条件, 以代替现行工艺中使用的均匀掺杂。比较了这两种方法平带电压的变化。文中提出的理论分析, 简化后可以应用于 MES 结构。

二、栅控特性

(一) 基本方程

MISS 结构如图 1(a) 所示。包括栅金属层 (M), 绝缘层 (I) 以及异质结 AlGaAs 层 (S) 和 GaAs 层 (S)。在绝缘体和半导体界面上存在有界面态电荷 σ (库·厘米⁻²), 而 2-DEG 在异质结界面的 GaAs 一侧形成。计算用的坐标如图 1(b), 取金属和绝缘层界面为原点。 d_1 和 d_2 分别为绝缘层和 AlGaAs 层的厚度, N 为 AlGaAs 中的掺杂浓度, 而 δ 表示其中非掺杂区厚度。系统的泊松方程为

$$\frac{d^2 V_1}{dx^2} = 0 \quad 0 \leq x < d_1, \quad (1)$$

$$\frac{d^2 V_2}{dx^2} = -\frac{qN}{\epsilon_2} \quad d_1 \leq x \leq d_1 + d_2 - \delta, \quad (2)$$

$$\frac{d^2 V_3}{dx^2} = 0 \quad d_1 + d_2 - \delta < x \leq d_1 + d_2. \quad (3)$$

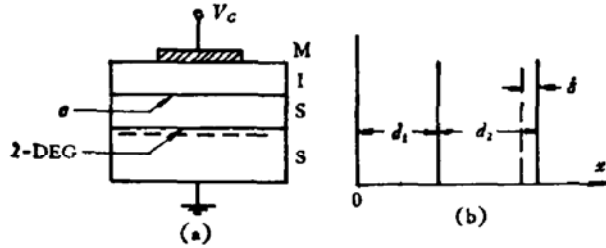


图1 MISS 结构

式中表明 AlGaAs 中的空间电荷全为离化杂质形成,不存在自由载流子。因之,在 $x = d_1 + d_2 - \delta$ 处不存在内建势。其边界条件和电位,电位移矢量连续条件为

$$V_1 = V_G, \quad x = 0, \quad (4)$$

$$V_1 = V_2 \quad \epsilon_1 \frac{dV_1}{dx} - \epsilon_2 \frac{dV_2}{dx} = \sigma \quad x = d_1, \quad (5)$$

$$V_2 = V_3 \quad \frac{dV_2}{dx} - \frac{dV_3}{dx} = 0 \quad x = d_1 + d_2 - \delta, \quad (6)$$

$$V_3 = \phi_s, \quad x = d_1 + d_2. \quad (7)$$

其中 ϵ_1 和 ϵ_2 分别为绝缘层和 AlGaAs 的介电常数, V_G 为栅压, ϕ_s 为 GaAs 的表面势, q 为电子电荷。方程(1)–(3)的解为

$$V_1 = Ax + V_G, \quad (8)$$

$$V_2 = -\frac{qN}{2\epsilon_2} x^2 + Bx + C, \quad (9)$$

$$V_3 = \left[B - \frac{qN}{\epsilon_2} (d_1 + d_2 - \delta) \right] x + D. \quad (10)$$

其中常数

$$A = \frac{1}{\epsilon_1 d_2 + \epsilon_2 d_1} \left\{ d_2 (\sigma - qN d_1) + \epsilon_2 \left[\phi_s - V_G + \frac{qN}{2\epsilon_2} (d_2^2 + 2d_1 d_2 - \delta^2) \right] \right\}, \quad (11)$$

$$B = \frac{1}{\epsilon_1 d_2 + \epsilon_2 d_1} \left\{ d_1 (qN d_1 - \sigma) + \epsilon_1 \left[\phi_s - V_G + \frac{qN}{2\epsilon_2} (d_2^2 + 2d_1 d_2 - \delta^2) \right] \right\}, \quad (12)$$

$$C = \frac{1}{\epsilon_1 d_2 + \epsilon_2 d_1} \left\{ d_1 (d_1 + d_2) (\sigma - qN d_1) + \epsilon_1 (d_1 + d_2) \left(V_G + \frac{qN d_1^2}{2\epsilon_2} \right) - d_1 (\epsilon_1 - \epsilon_2) \left[\phi_s + \frac{qN (d_1 + d_2)^2}{2\epsilon_2} - \frac{qN \delta^2}{2\epsilon_2} \right] \right\}, \quad (13)$$

$$D = \frac{qN}{2\epsilon_2} (d_1 + d_2 - \delta)^2 + C. \quad (14)$$

(二) 栅控特性和平带电压

如以 Q_s 代表 GaAs 中 2-DEG 的面密度, 则应满足

$$Q_s = \epsilon_2 \left(\frac{dV_3}{dx} \right) \Big|_{x=d_1+d_2} \quad (15)$$

由(15)式可以得到电荷与栅压的关系, 即栅控特性, 为

$$Q_s = -c_i(V_G - \phi_s) - \frac{c_i d_1}{\epsilon_1} (\sigma - qNd_1) - qN(d_1 + d_2) + \frac{c_i q N}{2\epsilon_2} (d_2^2 + 2d_1 d_2) + qN\delta \left(1 - \frac{c_i \delta}{2\epsilon_2} \right) \quad (16)$$

其中 $c_i = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 d_2 + \epsilon_2 d_1}$, 即为绝缘层和 AlGaAs 层之复合电容。 $Q_s - V_G$ 的关系可如下计算: 对给定的 ϕ_s , 用费米积分求出电荷密度 Q_s , 再由(16)式得到 V_G 。根据附录中的数字计算结果, 得到 2-DEG 的栅控特性如图 2 中所示。非掺杂层将使电荷密度有所下降, 不同界面态电荷密度 σ 和掺杂浓度 N 也使曲线相应平移。但是, 2-DEG 电荷密度随栅压的变化率总是一常数

$$\frac{dQ_s}{dV_G} = -c_i \quad (17)$$

根据(16)式, 令 $Q_s = 0$ 和 $\phi_s = 0$, 得到平带电压

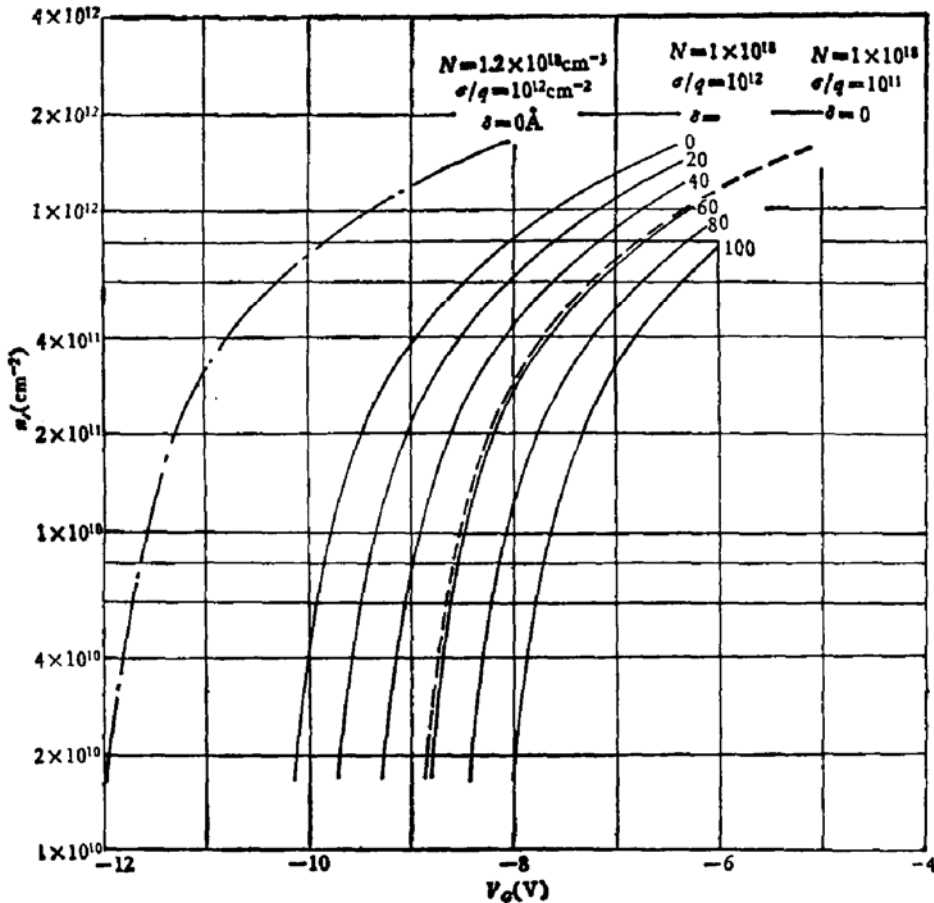


图 2 2-DEG 的栅控特性曲线

$$V_{FB} = -\frac{d_1}{\epsilon_1} (\sigma - qNd_1) - \frac{1}{c_i} qN(d_1 + d_2) + \frac{qN}{2\epsilon_2} (d_1^2 + 2d_1d_2) + \frac{qN\delta}{c_i} \left(1 - \frac{c_i\delta}{2\epsilon_2}\right) + \phi_{Ms} \quad (18)$$

其中 ϕ_{Ms} 为金属-半导体的接触电位差。

三、最佳掺杂条件

(一) 起始控制栅压

上述计算中,假定 AlGaAs 中的空间电荷为离化杂质所形成。 从而这时栅压范围给出一定的限制: 即存在一个临界栅压 V_{Gc} , 当 $V_G = V_{Gc}$ 时 AlGaAs 和 GaAs 之间处于平衡态。 这时,在 AlGaAs 中某一点 x_0 处的电位和电场应同时满足下列方程

$$\begin{cases} V_2 = \Delta_1 - \Delta_2 + \Delta E_c, & (19) \\ \frac{dV_2}{dx} = 0 & (20) \end{cases}$$

满足这一条件 MISS 结构的能带图画于图 3。 其中 Δ_1 和 Δ_2 分别为 GaAs 和 AlGaAs 中导带底与费米能级之差(以伏为单位,下同), ΔE_c 为异质结界面处二者导带底之差, E_{F0} 为异质结界面处 GaAs 导带底与费米能级之差, ϕ_M 为金属相对于绝缘层之功函数, E_M 为金属之费米能级。 解方程组(19)和(20)得

$$V_{Gc} = \phi_s - \frac{d_1\sigma}{\epsilon_1} + \frac{qNd_1^2}{2\epsilon_1} - \frac{qN(d_1 + d_2)}{c_i} + \frac{qN}{2\epsilon_2} [(d_1 + d_2)^2 - \delta^2]$$

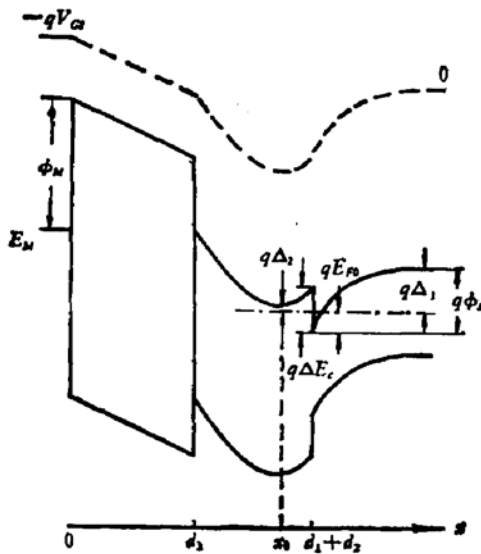


图 3 $V_G = V_{Gc}$ 时的能带图

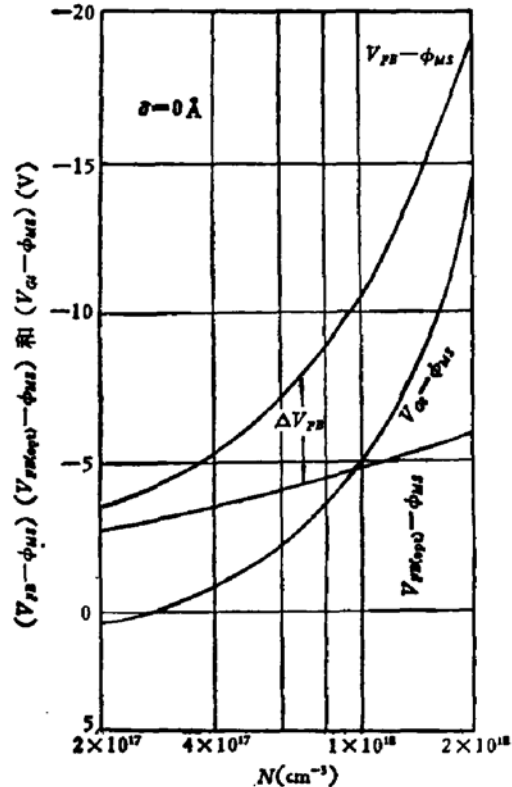


图 4 V_{FB} , V_{Gc} 和 $V_{FB(opt)}$ 与 N 的关系

$$+ \frac{\epsilon_2}{c_i} \left[\left(\Delta E_c - \Delta_2 - E_{FO} + \frac{qN\delta^2}{2\epsilon_2} \right) \frac{2qN}{\epsilon_2} \right]^{\frac{1}{2}} + \phi_{MS}. \quad (21)$$

所以,栅压仅在 V_{Gc} 到 V_{FB} 以内的范围才对 2-DEG 具有控制作用. 当 $V_G > V_{Gc}$ 时异质结处于平衡态, $V_G < V_{FB}$ 时界面处 GaAs 为耗尽层,两者均无控制作用. V_{Gc} 和 V_{FB} 与杂质浓度 N 的关系在图 4 中给出. 这两条曲线之间为具有控制作用的栅压范围.

(二) 最佳掺杂条件

当 $V_G = V_{Gc}$ 时, GaAs 中的 2-DEG 可得到最大(或平衡时)的电子浓度,计算结果示于图 5. 图中也给出了 D. Delegebeaudeuf 的结果(虚线)^[6].

由以上分析可以看出,对感生最大 2-DEG 有作用的离化杂质仅是 x_0 右方的一部分. 其左方的杂质不仅对感生这些 2-DEG 不起作用,而且使 V_{FB} 向负方向移动. 所以,为了制造增强型器件,最佳掺杂分布应为: 仅在 x_0 右方掺杂,使 x_0 左方杂质为零. 这样既保证了最大的 2-DEG 浓度,又不会造成平带电压额外的负向移动. 由式(19)和(20)可以解出 x_0 为

$$x_0 = \left[\frac{2\epsilon_2(\Delta_1 - \Delta_2 + \Delta E_c - c_i)}{qN} \right]^{1/2}. \quad (22)$$

其中 c_i 是 $V_G = V_{Gc}$ 时的 c 值(见式(13)). 可以得到在最佳掺杂时 MISS 结构的平带电压 ($\delta = 0$ 时)

$$V_{FB(opt)} = - \frac{qN[d_2^2 - (x_0 - d_1)^2]}{2\epsilon_2} - \frac{qN[(d_1 + d_2) - x_0]d}{\epsilon_1} - \frac{\sigma d_1}{\epsilon_1} + \phi_{MS}. \quad (23)$$

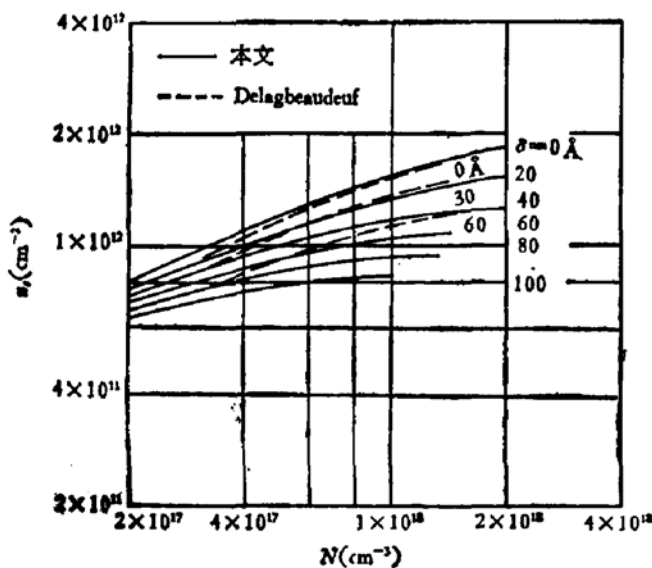


图 5 平衡 2-DEG 浓度与 N 的关系

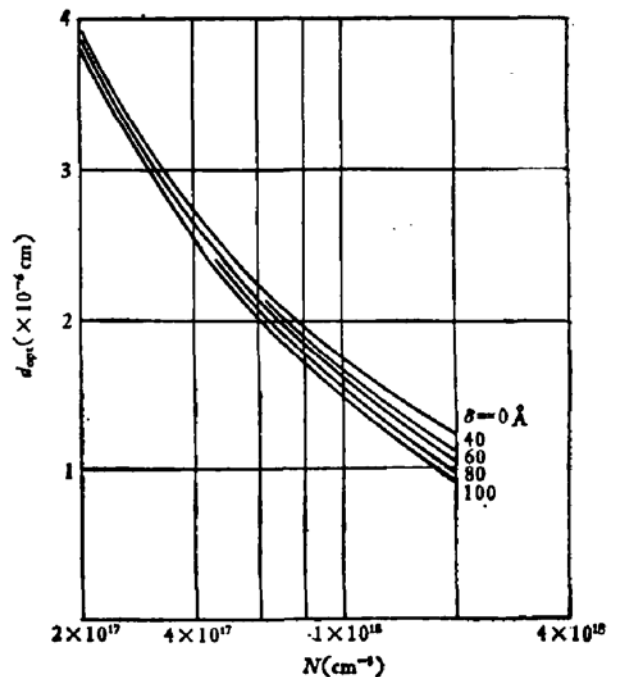


图 6 最佳掺杂厚度 d_{opt} 与 N 之关系

而由(18)式给出的均匀掺杂的平带电压 ($\delta = 0$ 时)为

$$V'_{FB} = -\frac{qNd_2^2}{2\epsilon_2} - \frac{qNd_1d_2}{\epsilon_1} - \frac{\sigma d_1}{\epsilon_1} + \phi_{MS}, \quad (24)$$

两者之差,即平带电压改善的程度为

$$\Delta V_{FB} = V_{FB(opt)} - V'_{FB} = qN(x_0 - d_1) \left[\frac{x_0 - d_1}{2\epsilon_1} + \frac{d_1}{\epsilon_1} \right]. \quad (25)$$

图 4 中同时给出了这两个平带电压的比较。可见 $V_{FB(opt)}$ 较 V'_{FB} 大大向正方向移动,而且 N 越大改善效果越明显。最佳掺杂厚度 $d_{opt} = d_1 + d_2 - x_0$ 与 N 的关系在图 6 中给出。

四、MES 结构应用

令 $d_1 = 0$ 和 $\sigma = 0$, 上述结果将给出表征 MES 结构各有关参量的全部表达式,为

$$Q_{S(MES)} = -\frac{\epsilon_2}{d_2} (V_G - \phi_s) - \frac{qNd_2}{2} - qN\delta \left(1 - \frac{\delta}{2d_2} \right), \quad (26)$$

$$V_{FB(MES)} = -\frac{qNd_2^2}{2\epsilon_2} + \frac{qNd_2\delta}{\epsilon_2} \left(1 - \frac{\delta}{2d_2} \right) \quad (27)$$

和

$$V_{G1(MES)} = \Delta_1 + E_{F0} - \frac{qN}{2\epsilon_2} (d_2^2 + \delta^2) + 2d_2 \left[\frac{qN}{2\epsilon_2} \left(\Delta E_c - \Delta_2 - E_{F0} + \frac{qN\delta^2}{2\epsilon_2} \right) \right]^{\frac{1}{2}} + \phi'_{MS}. \quad (28)$$

ϕ'_{MS} 为 MES 结构的金属-半导体接触电位差。把 $\phi'_{MS} = \phi_M - \Delta E_c - \Delta_1$ 代入(28)式,得

$$V_{G1(MES)} = \phi_M + E_{F0} - \Delta E_c - \frac{qN}{2\epsilon_2} (d_2^2 + \delta^2) + 2d_2 \left[\frac{qN}{2\epsilon_2} \left(\Delta E_c - \Delta_2 - E_{F0} + \frac{qN\delta^2}{2\epsilon_2} \right) \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (28)'$$

(28)' 式给出与 D. Delegebeaudeuf^[6] 文中的同样结果。所以他讨论的是本文中的一个简化情况。最佳掺杂厚度为

$$d_{opt(MES)} = \left[\frac{2\epsilon_2}{qN} (\Delta E_c - \Delta_2 - E_{F0}) \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (29)$$

五、结 论

通过对 MISS 和 MES 结构 AlGaAs/GaAs 异质结 2-DEG 栅控特性的分析,得到了平带电压,起始控制栅压与异质结构的几何、物理参量(如厚度,介电常数,界面态密度,掺杂浓度等)的关系。为设计良好特性的 HEMT (或 TEGFET) 提供了理论基础。

同时,文中给出了为制造增强型器件而应采用的最佳掺杂条件。因为它仅在 MBE

中进行不另增加工序,将使工艺简化、方便和可靠,会促进器件在大规模集成电路中的应用。

本工作部分在中国科学院上海冶金研究所完成。作者感谢与王涓源同志做的有益讨论。

附 录

对强积累和简并条件下 GaAs 表面的电子面密度为(忽略离化杂质电荷)^[10]

$$n_s = \frac{\epsilon_s kT}{q^2} \frac{1}{\mathcal{L}_D} \left[\frac{2/3 \cdot F_{3/2}(u_s - W_{c..i})}{F_{1/2}(W_{1..c})} \right]^{1/2}$$

其中, ϵ_s 为 GaAs 的介电常数, $\mathcal{L}_D = \left(\frac{\epsilon_s kT}{2q^2 n_i} \right)^{1/2}$ 为本征德拜长度, n_i 为本征载流子浓度, $F_i(\eta) = \int_0^\infty \frac{x^i dx}{1 + \exp(x - \eta)}$ 为费米积分, u_s 为归一化表面势, $W_{c..i} = -W_{1..c} = \frac{E_g}{2kT}$, E_g 为禁带宽度, k 为波尔兹曼常数, T 为绝对温度。

定义

$$F_i = \left[\frac{2}{3} \cdot \frac{F_{3/2}(u_s - W_{c..i})}{F_{1/2}(W_{1..c})} \right]^{1/2}$$

并取 $n_i = 1.2 \times 10^7$ 厘米⁻³, $\epsilon_s = 1.06 \times 10^{-12}$ 法·厘米⁻¹, $E_g = 1.43$ 电子·伏, $kT = 0.026$ 电子·伏,对本征 GaAs 衬底 $u_s = \frac{q}{kT} \phi_s$, 可得

$\phi_s(V)$	F_i	$n_s(\text{cm}^{-2})$	$\phi_s(V)$	F_i	$n_s(\text{cm}^{-2})$
0	0	0	0.611	1.31×10^6	2.60×10^{11}
0.360	8.10×10^5	1.65×10^{10}	0.637	2.08×10^6	4.25×10^{11}
0.520	2.20×10^6	4.49×10^{10}	0.663	3.41×10^6	6.90×10^{11}
0.546	3.63×10^6	7.41×10^{11}	0.689	5.51×10^6	1.13×10^{12}
0.572	5.99×10^6	1.22×10^{11}	0.715	8.72×10^6	1.78×10^{11}
0.598	9.87×10^6	2.01×10^{11}	0.741	1.33×10^6	2.70×10^{11}

再取 $d_1 = 800$ 埃, $d_2 = 500$ 埃, $\epsilon_1 = 8.85 \times 10^{-13}$ 法·厘米⁻¹, $\epsilon_2 = 1.06 \times 10^{-12}$ 法·厘米⁻¹ 和 $\Delta E_c = 0.3$ 伏,忽略 Δ_v 和 E_{FO} , 得图 2 的计算结果。

参 考 文 献

- [1] R. Dingle et al., *Appl. Phys. Lett.*, 33, 665 (1978).
- [2] S. Hiyamizu et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* 20, L455 (1981).
- [3] T. Mimura et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, 20, L598 (1981).
- [4] S. L. Su et al., *Electronics Lett.*, 18, 749 (1982).
- [5] T. Hotta et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, 21, L122 (1982).
- [6] D. Delegebeaudeuf and N. T. Linh, *IEEE Trans.*, ED-29, 955 (1982).
- [7] D. Delegebeaudeuf and N. T. Linh, *IEEE Trans.*, ED-28, 790 (1981).
- [8] T. Mimura, *Surface Science*, 113, 454 (1982).
- [9] W. B. Joyce and R. W. Dixon, *Appl. Phys. Lett.*, 31, 354 (1977).
- [10] R. Seiwatz and M. Green, *J. Appl. Phys.*, 29, 1034 (1958).

Gate Control Characteristics of 2-DEG in AlGaAs/GaAs Heterojunction and Optimum Doping

Shi Changxin

(Department of Applied Physics, Jiaotong University Shanghai)

Abstract

Theoretical analysis of gate control characteristics of the 2-DEG has been developed for both MISS (metal-insulator-AlGaAs-GaAs) and MES (metal-AlGaAs-GaAs) structures. The relationship between the flat-band voltage, which is important to the performance of FET, and the heterostructure parameters has been obtained. It should be noted that the conventional uniform doping is replaced by optimum doping in order to fabricate an enhancement-mode FET. The conditions for optimum doping are also presented.