

亚微米栅长调制掺杂场效应管 (MODFET) 的制造

杨玉芬 陈宗圭 张 矩

(中国科学院半导体研究所,北京) (北京工业学院物理系,北京)

1988年1月25日收到

本文简述了调制掺杂场效应管(MODFET)材料参数的设计原理, $0.2\mu\text{m}$ 栅长 T 型栅的制造工艺以及为了获得 $0.2\mu\text{m}$ 栅长的器件所要求的电子束曝光的详细条件。虽然所用材料的缓冲层纯度不够高 ($\sim 1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$), 但由于采用了 T 型结构, 器件室温跨导值仍达到了 200mS/mm , 在 77K 为 375mS/mm 。

主题词: 调制掺杂, 二维电子气, 亚微米栅长, 场效应晶体管

一、引言

由于发现了调制掺杂异质结界面处的二维电子气有着优越的传输特性, 在过去几年中利用二维电子气制造的高速和微波器件发展极为迅速。1980年制造出了第一个 AlGaAs/GaAs 调制掺杂场效应^[1] (MODFET) 器件, 稍后又研制出了高跨导的倒置 GaAs/AlGaAs 器件^[2]。1985年成功地制造出了单量子阱 InGaAs/AlGaAs 调制掺杂场效应器件^[3], 由于单量子阱结构导带不连续处能量差 ΔE_c 较大, 从而可得到较大的二维电子气的密度。单量子阱双异质结结构的 MODFET^[4] 1986年也制造成功了, 器件的性能有了明显的改进, 作为低噪声放大器应用已进入毫米波频段。1986年 Tasprit Singh^[5] 等建议用 $(\text{InAs})_n(\text{GaAs})_n$ 超晶格代替 InGaAs 构成量子阱沟道, 以避免由 InGaAs 沟道“合金”电位起伏引起的散射。预计器件性能会有显著的改进, 但这种想法目前尚未得到实验的证明。

我们的研究工作只限于 AlGaAs/GaAs 结构, 目的在于探索超短栅和 T 型栅的可能性, 如果能制出短于 $0.1\mu\text{m}$ 的栅长, 预计会有新的物理现象出现, 这是一个很值得探讨的问题, 我们实际做出的栅长为 $0.2\mu\text{m}$, 今后我们将对 $0.1\mu\text{m}$ 的超短栅长结构做进一步的研究。

二、材料参数的设计原理

调制掺杂材料可采用 MBE 或 MOCVD 方法制备, 为了获得高性能的器件, 要求材料参数最优化, 下面我们给出确定各层材料参数的物理原理。

1. 高纯度的 GaAs 缓冲层

这层的主要功能是形成二维电子气的沟道，为了降低器件的噪声和提高电子的迁移率，要求尽可能降低沟道中的离化杂质的散射，因此，这一层必须是高纯度的。一般说来，要求掺杂浓度小于 10^{14} cm^{-3} 。另一方面为了降低缓冲层带来的并联电导，要求这层略呈现 P 型而不是 n 型更为有利。其厚度选取 $8000 \text{ \AA} - 1 \mu\text{m}$ 为宜。

2. 未掺杂的间隔层

在异质结界面处势阱中的电子不仅受到高纯度 GaAs 缓冲层中残存的离化杂质的散射，也受到近界面处高掺杂 AlGaAs 层中离化杂质的库仑散射，从而降低了电子的迁移率并使器件的噪声增加。为了降低这种库仑散射的影响，通常是在缓冲层和 AlGaAs 层之间加入一个适当厚度的未掺杂的高纯度的 AlGaAs 间隔层，其作用是增加势阱到高掺杂 AlGaAs 层之间的距离，减小离化杂质对二维电子气中的电子的库仑作用，以便提高电子的迁移率和降低噪声。但高纯度的 AlGaAs 间隔层的存在也会使二维电子气的密度下降，因此这个间隔层的厚度要适当选择。理论分析和我们的实验结果都表明取 30 \AA 是比较适合的。

3. 高掺杂的 AlGaAs 层

高掺杂 AlGaAs 层的厚度和浓度也是很重要的材料参数，因为这层的参数与器件沟道中二维电子气的密度、噪声特性和跨导值等密切相关，例如在短沟道近似的条件下，噪声指数为⁽⁶⁾

$$F = 1 + 2\pi K_f C_{GS} \sqrt{(R_s + R_t)/g_m} \quad (1)$$

利用关系 $g_m = C_{GS}/L_G$ (2)

$$C_{GS} = L_G Z / d_d \quad (3)$$

可得到 $F = 1 + 2\pi K_f f \sqrt{\epsilon Z L (R_s + R_t) / d_d v_s} \quad (4)$

其中 f 为工作频率， K_f 为拟合因子（值为 1.5—2.0）， R_s 和 R_t 分别分源漏电阻， ϵ 介电常数， d_d 是 AlGaAs 层的厚度， Z 、 L 分别为沟道的长和宽， v_s 电子的饱和漂移速度。这方程表明在器件其它参数都固定的情况下，增加 AlGaAs 层的厚度 d_d 将使噪声指数下降。实际上如果 AlGaAs 层的厚度增加得太多，在器件工作时栅偏压不可能把栅极沟道下面的区域全部耗尽，从而有一个电中性区存在，构成一个有害的并联电导；同时也导致栅长与沟道厚度之比的下降。最终结果是器件跨导降低，性能变坏。因此确定 AlGaAs 层厚度的原则是保证在器件工作过程中没有电荷中性区存在。当 f_T 为 40 GHz ， $K_f = 1.5$ ，要求本征跨导超过 400 mS/mm 其栅长为 $0.5 \mu\text{m}$ 时，从(1)—(4)式计算 AlGaAs 层的厚度应为 400 \AA 左右。

掺杂浓度取决于两个因素，就是既要保证能在 AlGaAs 表面制造高质量的肖特基势垒，又要尽量降低“DX”中心陷阱的密度以保证有足够的二维电子气的密度，实验表明 $2-3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 是适当的。

4. 高掺杂的 GaAs 表面层

这一层有两方面的作用，一是高掺杂 GaAs 表面层的存在有利于制造高质量的欧姆接触，另一方面对 AlGaAs 表面层起着保护作用，防止在 AlGaAs 表面发生有害的化学变化。从以上两方面的考虑这层的厚度定为 $200-300 \text{ \AA}$ 就足够了。按照以上的考虑，我们使用的材料参数如图 1 所示。

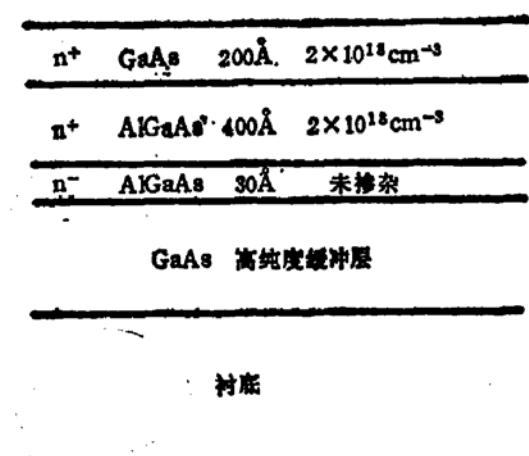


图 1 MODFET 的材料参数

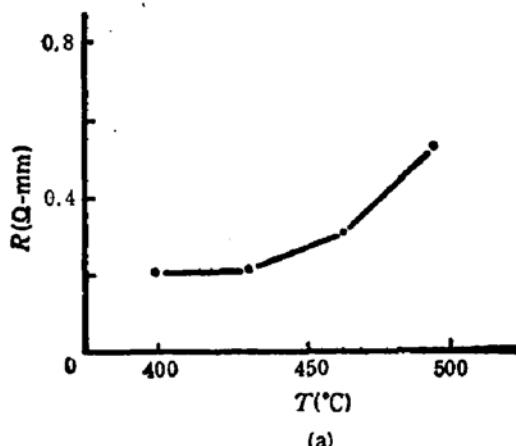


图 2(a) 欧姆接触电阻随合金温度的变化关系

三、制造工艺

MODFET 制造工艺与 MESFET 大体相同,由于我们研制的是超短栅和 T 型栅结构,因而在栅的制造方面有着其独特的制造工艺步骤,对此我们将给予详细地说明。全部工艺过程如下:

(1) 台面形成 这一步关键是控制好台面的高度和选用各向同性的腐蚀液,以保证栅极在爬坡处不至于断开。通过实践发现 $H_3PO_4:H_2O_2:H_2O$ 系腐蚀液是比较理想的,在台面的四个侧面都能形成梯形的结构,台面高度要求超过二维电子气阱到表面的距离,按照我们前一部分材料参数考虑以 1500 Å 到 2000 Å 为适。台面过高会给栅极制造带来困难。

(2) 源漏欧姆接触 为了成功地进行金属剥离做出完好的欧姆接触图形,要对光刻胶钻蚀,要求曝光后的光刻胶在氯化苯中浸泡的时间要适当。这要根据使用的化学药品和周围环境摸索适合自己实验室条件的浸泡时间。

为了获得良好的欧姆接触(要求欧姆接触小于 $0.2\Omega \cdot \text{mm}$),所用材料,各层厚度、合金温度和时间都是不可忽视的因素,这要根据研究者使用的设备,合金炉的类型找出最佳实验条件。我们采用 AuGa-Ni-Au 系,其厚度分别为 $2000\text{ Å} - 500\text{ Å} - 1000\text{ Å}$, 合金温度 430°C , 90 秒, 其欧姆接触值为 $0.15 - 0.18\Omega \cdot \text{mm}$, 典型的欧姆接触电阻随合金温度的变化及欧姆接触图形如图 2(a) 和 2(b) 所示。图 2(b) 见图版 I.

(3) 超短 T 型栅的制造 为了制成超短 T 型栅,我们采用了三层胶电子束光刻技术。即 PMMA-Copolymer-PMMA 三层胶,要求仔细控制各层胶的厚度和电子束曝光的条件,以及电子束曝光后各层胶的显影时间。当把电子束曝光电流控制在 0.0170nA 左右时可获得 $0.2\mu\text{m}$ 的栅长。

在栅金属蒸发之前,栅槽的腐蚀要特别仔细,必须边腐蚀边监测漏极电流,当达到所要求的数值范围时,腐蚀立刻停止,为减少表面沾污、确保能获得高质量的肖特基势垒,腐蚀栅槽用 $NH_4OH:H_2O_2:H_2O$ 的腐蚀液为好。在蒸发栅金属之前还要用 $NH_4OH:H_2O$

清洁处理。栅金属的厚度可控制在 4000 \AA 到 5000 \AA 的范围内。在同样的厚度下，T型栅的栅电阻小于通常栅电阻的 $\frac{1}{2}$ 。栅长为 $0.2\mu\text{m}$ 的典型结构示于图3(见图版1)。

为了便于键合引线，在肖特基势垒栅做完之后，再做一次金属化，蒸发金的厚度在 1500 \AA 到 2000 \AA 之间，然后再完成介质保护和减薄工艺。

四、结 果

$0.2\mu\text{m}$ 栅长 $2 \times 50\mu\text{m}$ 栅宽器件的室温漏极电流-电压特性示于图4。从图可见

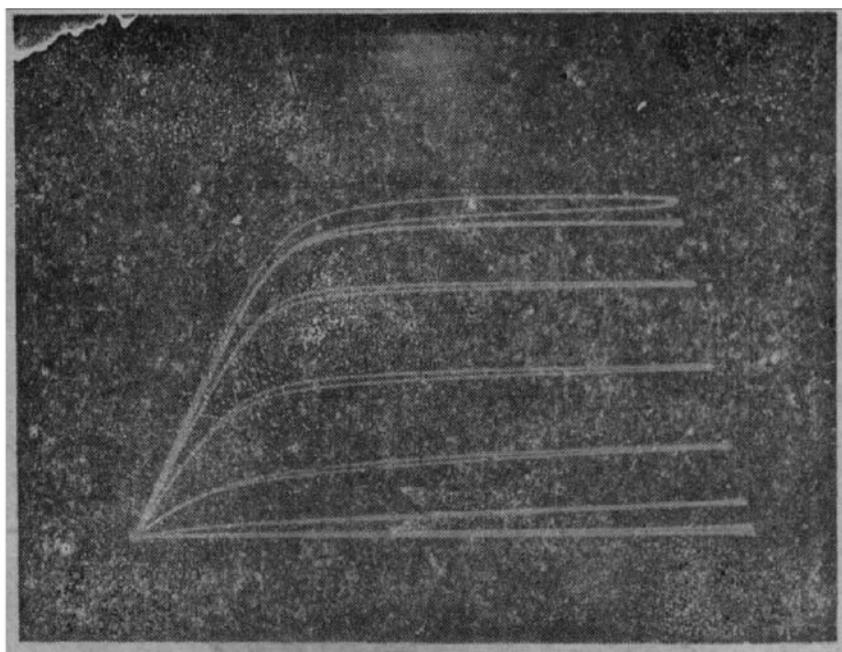


图4 室温条件下的电流-电压特性曲线纵坐标 I_D 每格 10 mA ，横坐标 V_D 每格 0.5 V ，最高的曲线对应栅压 $V_g = 0$ ，以下每条曲线递增 -0.5 V 。

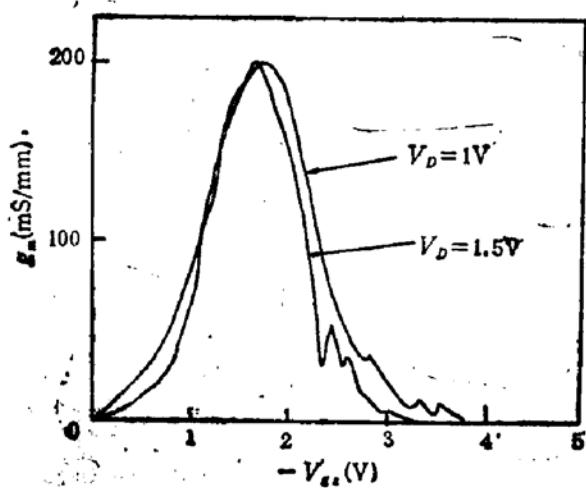


图5 跨导 G_m - V_{GS} 特性曲线

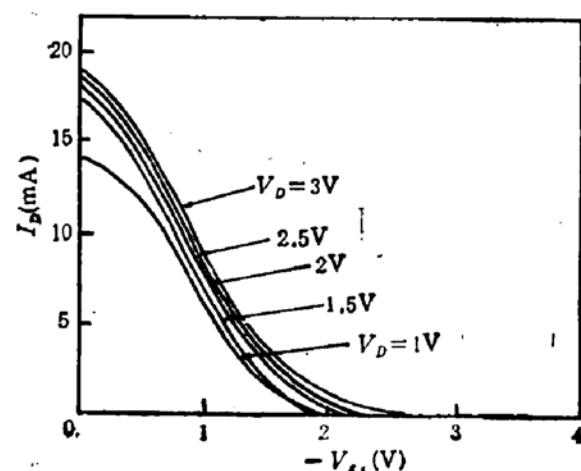


图6 I_D - V_{GS} 转移特性曲线

曲线有着极好的饱和特性和夹断特性。跨导 $g_m - V_{GS}$ 曲线示于图 5。这组曲线是用 HP 4145 半导体参数分析仪测出的。室温跨导值为 200mS/mm 左右，最大的跨导值为 240mS/mm 。 $I_D - V_{GS}$ 转移特性示于图 6，漏极电压为 1 伏时，夹断电压为 1.8 伏。沟道电阻 $R_t - V_{GS}$ 特性示于图 7。图 8 给出了一个器件的室温和液氮温度下的两组 $I_D - V_D$ 曲线，从图可知室温跨导为 200mS/mm 的器件在液氮温度下为 375mS/mm 。

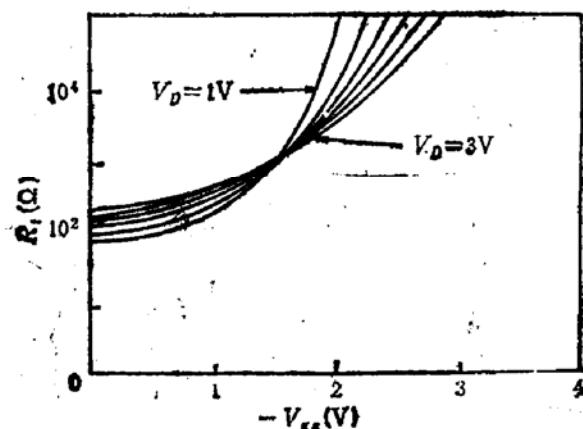


图 7 沟道电阻 $R_t - V_{GS}$ 变化特性

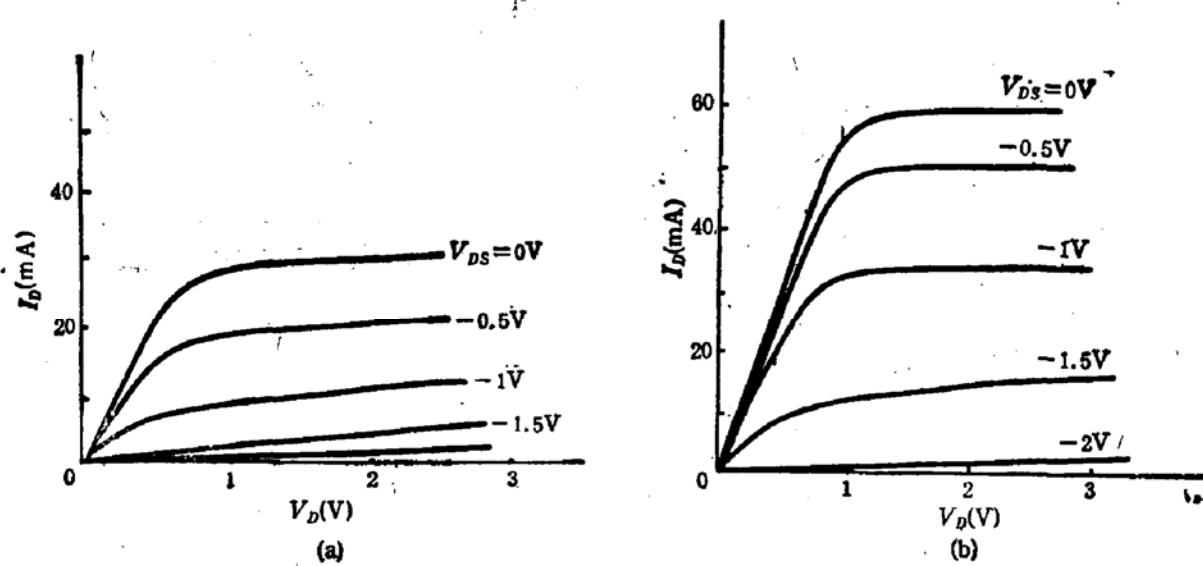


图 8 室温 (a) 和液氮温度 (b) 下的 $I_D - V_D$ 特性

实验中发现所用材料的横向质量很不一致，多数材料只有其中某一部位的材料能做出有较好参数的器件。标志材料质量的两个主要参数：电子的迁移率和二维电子气的浓度都得具有适当的值，仅其中一个高而另一个偏低时都不能做出好的器件。通常要求液氮温度下电子的迁移率得达到 $80000\text{cm}^2/\text{v} \cdot \text{s}$ 以上，二维电子气的密度得有 $8 \times 10^{11}\text{cm}^{-2}$ 左右。另外在栅的制造中，发现采用热蒸发的工艺比电子束蒸发的肖特基势垒的质量要好。经验表明，蒸发的速率不能太高，以每秒钟 $6-8\text{\AA}$ 较为合适。用三层胶技术得到的栅电阻比两层胶制造的栅电阻明显地低，实验证明 T 型栅的制造是切实可行的，尤其超短栅

器件的制造,T型栅结构更显必要的了。

Chalmers 大学物理系分子束外延组提供了调制掺杂的材料,在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] T. Mimura, S. Hiyamizu, T. Fujii and K. Nanbu, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **19**, L225 (1980).
- [2] Nicholas C. Cirillo, Jr., Michael S. Shur and Jonathan K. Abrokwa, *IEEE Trans.*, **ED-7**, 71 (1986).
- [3] J. Rosenberg, M. Benlamri, P. D. Kirchoer, J. M. Woodall and G. D. Pettit, *IEEE Electron Device Lett.*, **EDL-6**, 491 (1985).
- [4] T. Henderson, M. I. Aksan, C. K. Peng, *IEEE Electron Device Lett.*, **EDL-7**, 649 (1986).
- [5] Tasprit Singh, *IEEE EDL-7*, 436(1986).
- [6] Hikaru Hida, Kuniichi Ohata, *IEEE Electron Device. Lett.*, **EDL-33**, 601 (1986).

Fabrication of Submicron Gate Length Modulation Doped $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ Field Effect Transistors

Yang Yufen, Chen Zhonggui

(Institute of Semiconductors, Academia Sinica, Beijing)

Zhang Ju

(Beijing Institute of Technology)

Abstract

This paper describes the design principle of modulation doped $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ field effect transistors (MODFET), processing steps of gate length as short as $0.2 \mu\text{m}$ with T type gate and the conditions of the E-Beam lithography to obtain submicron gate length. Transconductances of the order of 200 mS/mm at room temperature and 375 mS/mm at 77 K are measured.

KEY WORDS: Modulation doped, Two-dimensional electron gas, Submicron gate length, Field effect transistors