

具有 MIS 结构的 n-AlGaAs/InGaAs/ n-GaAs 双调制掺杂赝 HEMT*

相 奇 罗晋生

(西安交通大学微电子研究室, 西安 710049)

曾庆明

周均铭 黄 绮

(机械电子部第十三研究所, 河北石家庄, 050051) (中国科学院物理研究所, 北京, 100080)

1990年12月24日收到, 5月8日修改定稿

本文设计和研制了具有 MIS 结构的 n-AlGaAs/InGaAs/n-GaAs 双调制掺杂赝 HEMT。它结合了 MISFET 和双调制掺杂赝 HEMT 的特点。1 μm 栅长器件的最大漏电流密度达 400 mA/mm, 栅反向击穿电压高达 15V。器件还显示了良好的微波射频特性。

EEACC: 2560S, 2530N, 0510D

一、引言

近十年来, 高电子迁移率晶体管(HEMT)在高速和微波领域得到了极为迅速的发展。1980年研制出了第一个 AlGaAs/GaAs HEMT^[1], 稍后又研制出了高跨导的倒置 GaAs/AlGaAs HEMT^[2]。1985年成功地研制出了单调制掺杂的 AlGaAs/InGaAs 蕴 HEMT^[3], 随后双调制掺杂的赝 HEMT 也于1986年研制成功^[4]。常规结构的 HEMT ($N_D: 1 \sim 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $n_s < 1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$), 其主要弱点是漏端电流密度和栅反向击穿电压均较低(典型值分别为 100—200mA/mm 和 4—8V), 且存在 DX 中心。这大大地限制了其在高速 IC 和微波功率领域中的应用。与常规 HEMT 相比, 蕴 HEMT 由于 ΔE_c 较大, 既可获得较大的二维电子气(2DEG)密度从而提高电流驱动能力, 又可增强对 2DEG 的限制从而降低器件的输出电导提高器件的功率附加效率; 又由于低的 Al 摩尔分数($x \leq 0.2$), 消除了 DX 中心。双调制掺杂的赝 HEMT 可进一步提高电流驱动能力。但由于减小 Al 摩尔分数减小了 AlGaAs 的带隙宽度, 且仍具有较高的掺杂浓度, 因此赝 HEMT 的栅反向击穿电压仍很低。1987年一种与常规 HEMT 掺杂结构完全相反的 i-AlGaAs/n-GaAs MISFET 研制成功^[5]。MISFET 不再具有高的电子迁移率, 但却具有很大的电流驱动能力。且由于表面不掺杂的宽带隙 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (通常 $x > 0.3$)存在, 使其具有很高的栅反向击穿电压和很大的正向栅压容限, 也不存在 DX 中心。

本文设计和研制了一种具有 MIS 结构的 n-AlGaAs/InGaAs/n-GaAs 双调制掺杂

* 本课题得到国家教委博士点基金资助。

赝 HEMT (简称 MIS-PHEMT)。目的在于集中双调制掺杂赝 HEMT 和 MISFET 的优点, 研制既具有大的电流驱动能力又具有高栅反向击穿电压的器件。这是一个很有价值的研究课题, 在微波功率领域和高速 IC 中都有着广阔的应用前景。

二、材料结构与器件制造

MIS-PHEMT 材料结构如图 1 所示。它包括在半绝缘 GaAs 衬底上约 $1 \mu\text{m}$ 厚的 i-GaAs 缓冲层, 100 \AA Si 掺杂 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的 GaAs 层, 50 \AA i-GaAs 隔离层, 120 \AA i-In_{0.19}Ga_{0.81}As 沟道层; 50 \AA i-Al_{0.4}Ga_{0.6}As 隔离层, 100 \AA Si 掺杂 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的 Al_{0.2}Ga_{0.8}As 层, 200 \AA i-Al_{0.4}Ga_{0.6}As 绝缘层。用于源漏接触的表面层包括 200 \AA Si 掺杂 $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ Al 摩尔分数从 0.25 渐变到零的 n⁺ 缓变带隙层和 100 \AA Si 掺杂 $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的 n⁺ GaAs 层。为了进一步增大 ΔE_c 从而进一步地增大 2DEG 密度和增强对 2DEG 的限制, 我们设计沟道层 InGaAs 中 In 摩尔分数为 0.19, AlGaAs 隔离层中 Al 摩尔分数为 0.4。相应地 InGaAs 沟道层厚减薄为 120 \AA ; 以便弹性吸收晶格失配产生的界面应力形成良好的形变沟道层。为了既消除 DX 中心又能获得更大的 2DEG 密度, n⁺AlGaAs 层 Al 摩尔分数设计为 0.2, 增大掺杂浓度到 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。相应地 n⁺AlGaAs 层厚减小为 100 \AA , 以避免平行电导效应。不掺杂的 AlGaAs 绝缘层 Al 摩尔分数设计为 0.4, 以增大带隙宽度, 从而进一步增大栅击穿电压, 减小反向漏电。表面层重掺杂 $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 以及缓变带隙层的插入是为了减小欧姆接触电阻和寄生串联电阻。对于象这样的较复杂的异质结构场效应管(统称 HFET), 还没有一个简单的解析模型可供定量的设计计算。我们的定量计算是应用我们发展的一个具有一般性的 HFET 一维电荷控制模型^[6]。模型是基于异质结构的数值模拟和常规 HEMT 电荷控制模型的基本思想。模拟预期的本征 MIS-PHEMT 最大饱和电流达 600 mA/mm , 最大跨导为 300 mS/mm 。

图 1 MIS-PHEMT 材料结构

我们的材料是在国产 IV 型 MBE 设备上生长的。InGaAs 层生长的衬底表观温度为 750°C , 其余各层生长的衬底表观温度为 820°C 。Al 摩尔分数在 0.2 与 0.4 之间的突变由双 Al 源炉实现。

器件的制造工艺与 GaAs MESFET 类似, 简述如下: 用双硼离子注入实现器件隔离。源漏欧姆接触用 AuGeNi/Au 在 Ar 气氛下约 450°C 1 分钟合金来实现。用湿法化学腐蚀挖槽。栅金属为 Ti/Pt/Au。栅及源漏图形的形成均采用 SiO₂ 介质辅助剥离工艺。聚酰亚胺兼作钝化和互联隔离膜。一个典型的 $1 \mu\text{m}$ 栅长, $4 \times 75 \mu\text{m}$ 栅宽, 源漏间距为

5 μm 的器件管芯照片如图 2* 所示。

三、器件特性

1. DC 特性

图 3* 和图 4* 分别为阈值电压是 -0.6V 和 -1.8V 的 MIS-PHEMT 室温下的直流 I-V 特性。两器件的栅长均为 1 μm，栅宽均为 $4 \times 75 \mu\text{m}$ 。阈值电压由挖槽深度决定。由图可见，曲线具有较好的饱和特性和夹断特性，并有很大的正向栅偏压容限。最大漏极电流密度 ($V_c = 2.5\text{V}$) 分别为 300mA/mm 和 400mA/mm，远远大于常规单异质结 HEMT 的饱和电流 (100—200 mA/mm)。测得的最大跨导分别为 120 mS/mm 和 140 mS/mm。跨导较低的原因是源漏寄生串联电阻较大。寄生电阻大也使 I-V 特性的饱和压降较大(两器件均约为 3V)。跨导随栅偏压变化的典型关系(见图 5 中上面一条曲线)显示了很好的均匀性。图 6 给出了器件典型的栅反向击穿特性。在栅电流为 1mA/mm 条件下，栅反向击穿电压约为 15V。表 1 总结了 MIS-PHEMT 的直流特性并与国外已发表的相当栅长的功率 HEMT 的测试结果以及常规 HEMT 的典型结果进行了比较。对比表中结果可知，我们制作的 MIS-PHEMT 的直流特性，就电流密度和击穿特性而言，已远远超过了常规 HEMT，达到甚至超过了国外同等沟道长度的功率 HEMT。我们的器件较成功地解决了既要提高漏端电流密度，又要提高栅反向击穿电压的矛盾。

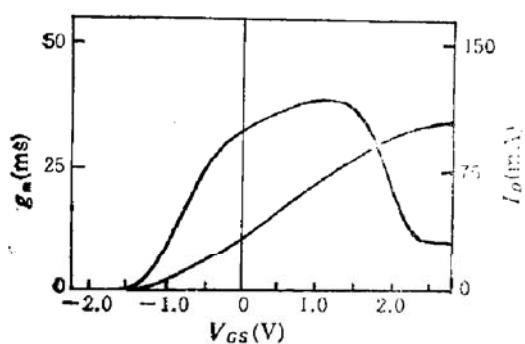


图 5 典型 MIS-PHEMT 跨导
随栅压变化曲线

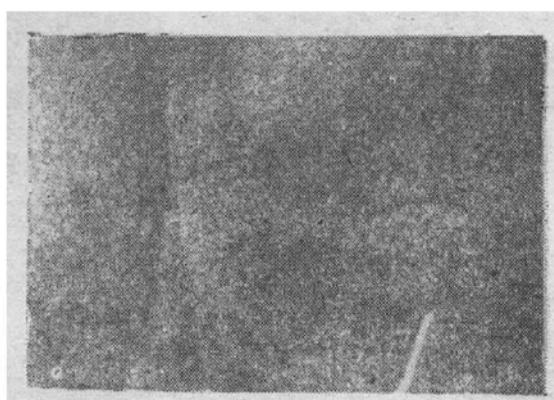


图 6 典型 MIS-PHEMT 栅反向击穿特性
 $V_G: 2\text{V/div}$ $I_G: 0.4\text{mA/div}$

2. RF 特性

测试的典型 MIS-PHEMT S 参数圆图如图 7 所示。测试系统为 HP 网络分析仪。主要特性简述如表 2。器件显示了良好的微波射频特性。

3. 讨论

从栅反向击穿电压和最大电流密度来看，MIS-PHEMT 比较符合我们设计预期的结果。器件的直流跨导与设计的要求差距较大，其主要原因是器件的寄生串联电阻较大。造成寄生电阻大的原因主要有两个：一是 MIS 结构中绝缘层的存在会增大串联电阻；二

* 图 2、3、4 见图版 I.

表 1 直流特性测试结果比较

	MIS-PHEMT		常 规 HEMT	功 率 DH-HEMT
	准增强 (样管 1)	耗 尽 (样管 2)	典型参数 自文献[7]	Fujitsu, 1986. 自文献[7]
$L(\mu\text{m})$	1	1		1
$W(\mu\text{m})$	300	300		1200
$V_{th}(\text{V})$	-0.6	-1.8		-2.5
$g_m(\text{max})(\text{ms/mm})$	120	140		120
$I_{D\text{max}}(\text{mA/mm})$ ($V_G = 2.5\text{V}$)	300	400	100~200	230
$BV_G(\text{V})$ ($I_D = 1\text{mA/mm}$)	15	14	4~8	12
$BV_{DS}(\text{V})$ ($I_D = 1\text{mA/mm}$)	≥ 20	≥ 18		17

表 2 微波主要特性简表

参 数	频 率	200MHz	13.1GHz
$S_{21}(\text{MAG})$		2.973	1.016
$H_{11}(\text{MAG})$		18.069	2.980
GU_{max}		64.29dB	4.96dB

是利用现有合金工艺，欧姆接触电阻较大。我们在实验中发现合金条件对器件的饱和压降和饱和电流都有很大的影响。减小寄生串联电阻须进一步开展研究工作，一是可采用自对准工艺减小源漏串联电阻；二是改进欧姆接触制备工艺，如采用快速热退火方式进行合金等，以减小欧姆接触电阻；三是可采用高 In 含量重掺杂的 InGaAs 表面层以形成非合金的欧姆接触^[3]。

直流测试没发现明显的光电导，说明不存在 DX 中心。从直流 $I-V$ 特性可看出，从夹断电压到相当的正偏范围也不存在显著的平行电导。采用 MIS 结构，应具有比常规 HEMT 更好的阈值均匀性，这对批量生产和 IC 的制造相当有利。由于 MIS-PHEMT 中存在一宽带隙的绝缘层 ($\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$) 非常适合应用选择腐蚀。因此可以应用如 RIE 选择腐蚀来改进挖槽工艺，以进一步改善器件参数的大面积均匀性。

我们研制的 MIS-PHEMT，设计的栅长为 $1\mu\text{m}$ ，但实际光刻剥离出的栅长在 $1.2\mu\text{m}$ 左右。有效栅长的增大会降低器件的频率特性。寄生电阻大也会大大地降低器件的微波射频特性。尽管如此，从测试结果看，MIS-PHEMT 仍然显示了良好的微波射频特性。进一步改进器件微波射频特性的关键在于缩小器件的有效沟道长度和源漏间距。这需要改善图形加工工艺环境，加强微细图形的研究工作，包括光刻设备、光刻材料的更新。若将器件特征尺寸缩小到 $0.5\mu\text{m}$ 以下，同时改善图形形貌，可望获得有可靠增益的高性能毫米波器件。

本文研制的 MIS-PHEMT，可望在微波功率和高速逻辑 IC 中得到应用。高夹断电

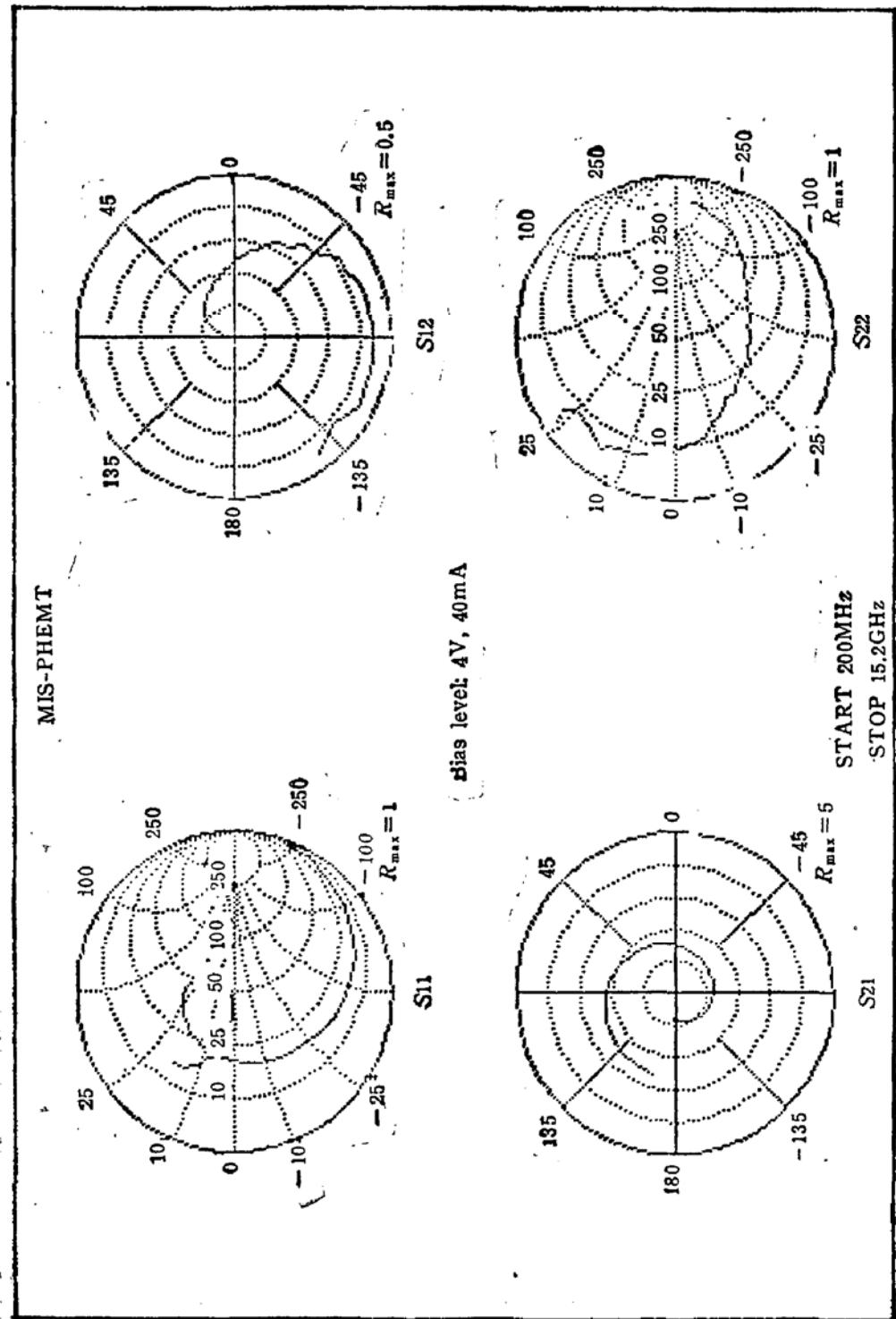


图 7 测试的 MIS-PHEMT S 参数圆图

压样管(样管2),就直流功率特性而言,已远远超过了常规HEMT,达到甚至超过了国外同等沟道长度的功率DH-HEMT。低夹断电压样管(样管1),可直接用于源耦合场效应管逻辑IC(SCFLIC)。大的正向栅压容限和大的漏电流密度将使IC具有大的逻辑摆幅、高的噪声容限和大的电流驱动能力(大扇出)。用这种材料结构试制SCFL分频器的研究工作正在进行中。

四、结 论

本文设计和研制的MIS-PHEMT,结合了MISFET和双调制掺杂PHEMT的特点,既具有大的电流密度又有高的栅反向击穿电压。器件的最大漏电流密度达 400mA/mm ,栅反向击穿电压高达 15V 。器件还显示了良好的微波特性。MIS-PHEMT不仅适合于微波功率应用,也适合于高速逻辑电路。

本文作者感谢中国科学院物理研究所605组在分子束外延材料生长方面的支持;感谢机械电子工业部十三所二室201组的同志在器件制造方面的合作;感谢十三所十三室在器件微波特性测试方面的帮助。

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 and M. S. Shur, *IEEE Trans.*, **ED-7**, 71(1986).
- [3] J. Rosenberg and M. Benlamri, *IEEE Electron Device Lett.*, **EDL-6**, 491 (1985).
- [4] T. Henderson and M. I. Aksan, *IEEE Electron Device Lett.*, **EDL-7**, 649(1986).
- [5] H. Hida, A. Okamoto, H. Toyoshima and K. Ohata, *IEEE Trans.*, **ED-34**, 1448(1987).
- [6] 相奇,西安交通大学博士论文,1991
- [7] K. Hikosaka, Y. Hirachi and M. Abe, *IEEE Trans.*, **ED-33**, 583(1986).
- [8] S. Kuroda, N. Harada, T. Katakami, T. Mimura and M. Abe, *IEEE Trans.*, **ED-36**, 2196 (1989).

n-AlGaAs/InGaAs/n-GaAs Double Modulation Doped Pseudomorphic HEMT with MIS Structure

Xiang Qi Luo Jinsheng

(Microelectronic Technology Division, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Zeng Qingming

(Hebei Semiconductor Research Institute, Shijiazhuang 050051)

Zhou Junming and Huang Yi

(Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract

The n-AlGaAs/InGaAs/n-GaAs Double Modulation Doped Pseudomorphic HEMTs with MIS structure combining the advantages of MISFET and double modulation doped pseudomorphic HEMT have been designed and fabricated. For the 1 μ m gate device, the maximum drain current reaches 400 mA/mm, and the gate reverse breakdown voltage is as high as 15V. The devices also show the good microwave characteristics.

EEACC: 2560S, 2530N, 0510D