

Research on the GaAs-Based PHEMT Acceleration Sensor*

JIA Xiaojuan, ZHANG Binzhen*, LIU Jun, XUE Chenyang, HOU Tingting,
TAN Zhenxin, WANG Jie

(National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, Key Laboratory of Instrumentation Science &
Dynamic Measurement, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Pseudomorphic HEMT has become a most active research topic of micro-electronics field because of its advantages in high-frequency and low-yawp. It is one of the research directions of the most forward position to fabricate accelerator with the force-sensitive characteristic of PHEMT. According to the piezoresistive effect theory of GaAs-based PHEMT, a novel cantilever accelerated sensor has been designed and fabricated. The drain current output of PHEMT changes when the force is applied on the cantilever. And then the change of drain current is detected through the external testing circuit. The structure and mechanical characteristics are described in this paper. The testing results show that the relationship between drain current and gate voltage, drain voltage under the dynamic test is accordant with the static IV characteristic. The accelerometer has good linearity and the sensitivity has been calculated that is $0.177 \text{ mV}/g_n$ in saturation region.

Key words: micro-accelerometer; PHEMT; dynamic test; sensitivity; GaAs

EEACC: 7320E; 2575

GaAs 基 PHEMT 加速度传感器的研究*

贾晓娟, 张斌珍*, 刘俊, 薛晨阳, 侯婷婷, 谭振新, 王杰

(中北大学电子测试技术国家重点实验室, 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051)

摘要: PHEMT 结构一种高电子迁移率晶体管, 以其高频和低噪声等方面的优越性, 成为当今微电子领域中最活跃的研究主题之一。将其良好的力敏特性应用在加速度计方面更是成为前沿的研究方向。基于 GaAs 基 PHEMT 结构压阻效应, 设计加工出一种悬臂梁式微加速度传感器, 通过力作用在加速度计上, 改变 PHEMT 结构漏极电流的输出, 并通过外围测试电路来检测该电流变化, 从而实现力电转换。文中, 对其基本原理和结构设计进行阐述, 并进行力学特性的研究。结果表明, 在动态测试下, PHEMT 结构的漏极输出电流与栅压、漏压之间的关系与静态测试 I-V 特性曲线保持一致。该加速度计具有良好的线性特性, 经过测试在饱和区灵敏度为 $0.177 \text{ mV}/g_n$ 。

关键词: 微加速度计; PHEMT; 动态测试; 灵敏度; GaAs

中图分类号: TN386.3; TN304.07

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2010)02-0188-04

1980 年, 一种新的调制掺杂 GaAs/AlGaAs 异质结场效应管, 即高电子迁移率晶体管 HEMT 结构问世^[1], 随之, HEMT 以其高频、高速、低噪声、大功率^[2]等优势, 在通信等领域得到了广泛应用。匹配高电子迁移率晶体管^[3-4] (PHEMT), 是一种采用异质结构和调制掺杂技术的场效应晶体管。其性能主要依赖于所用结构材料的二维电子气性质, 即依赖于外电场作用下 PHEMT 结构材料中二维电子气 (2DEG) 的输运性质。以此为敏感单元的微纳机械传感器的相关研究已经引起国际上研究人员的关

注, 并且已经将此结构应用在气体、液体及温度传感器上^[5-7], 并取得了良好的效果。而将 PHEMT 结构作为加速度计的敏感单元, 利用其力电耦合特性来测试压力变化的研究并不多。

GaAs 系材料是最早开发使用的半导体材料系统, 是除硅以外研究最为成熟的集成材料^[8-9], 在超高速、超高频、低功耗、低噪音器件和电路中有着广泛的应用^[10]。集二者之优点, GaAs 基 PHEMT 器件具有良好的 I-V 特性和电压传输特性^[11-12], 将其作为敏感单元用在加速度计上, 依据力电转换的原理, 将

项目来源: 国家自然科学基金重点项目资助 (50730009) “e 指数半导体器件嵌入式微纳机械结构高灵敏传感器基础研究”; 纳米晶体管嵌入式传感结构加工工艺及其性能研究 (2008CB317104)

收稿日期: 2009-09-11 **修改日期:** 2009-11-09

力学信号转换为可测的电学信号来测量微小应力变化,可取得显著的效果。本文主要通过振动台实验研究 GaAs 基 PHEMT 嵌入式微加速度传感器分别在线性区和饱和区的线性特性和灵敏度,并分析动态测试条件下,漏源偏压,栅源偏压对传感器输出的影响。

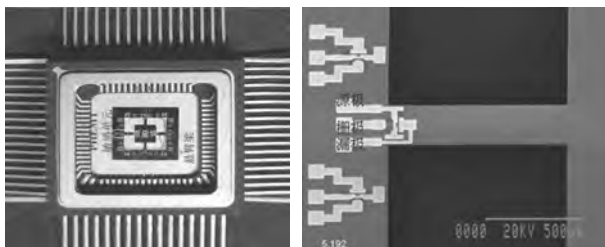
1 加速度传感器结构

1.1 基本原理

GaAs 基 PHEMT 嵌入式微加速度传感器是以 Al-GaAs/GaAs 基 PHEMT 的“力电耦合原理”为基理的。当传感器受到一定的加速度作用时,质量块会产生偏移,进而引起梁产生扭曲等变形,在 PHEMT 沟道中产生应力变化,半导体材料的能带结构也发生相应变化。应力能同时减小其有效质量和散射几率,从而在很大程度上提高电子迁移率,从而导致二维电子气限制作用变化和沟道电子的浓度的变化。同时应力将会引起沟道长度宽度以及增益因子的变化,随之源漏电流发生改变,最终反映到 PHEMT 的 I-V 特性变化,利用适当的外围电路将这种变化转换为可测的电压、电流信号,经过标定可建立输出信号与被测加速度之间的关系,从而可以测量外界加速度。

1.2 结构设计

加速度计结构采用四悬臂梁结构,敏感单元置于梁的根部,频率响应范围较大,也可以在一定程度上解决横向灵敏度的问题。综合考虑传感器的量程,固有频率,线性特性和灵敏度,GaAs 材料的特性,以及实际工艺条件的限制等问题,传感器结构的具体参数设计如下:质量块 $1\ 600\ \mu\text{m} \times 1\ 600\ \mu\text{m} \times 150\ \mu\text{m}$;悬臂梁 $800\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$ 。如图 1 所示为封装好的传感器以及敏感单元 PHEMT 结构的 SEM 图。



(a)传感器封装图

(b)敏感单元PHEMT的SEM图

图1 传感器及其敏感单元 PHEMT 结构图

2 加速度计性能测试与分析

本文主要通过 GaAs 基 PHEMT 加速度计的动态测试,研究加速度计的线性特性和灵敏度,并对影响其漏极输出的参数进行讨论。

2.1 I-V 特性测试与分析

在进行动态测试之前,对加速度计的敏感单元

PHEMT 结构的 I-V 特性和转移特性进行测试。由 Agilent 半导体特性分析仪 4156C,测得 PHEMT 完整的 I-V 特性曲线(如图 2),说明加速度计性能完整。在漏极电压 V_D 大于 $1.8\ \text{V}$ 时 PHEMT 结构进入饱和区,工作稳定。

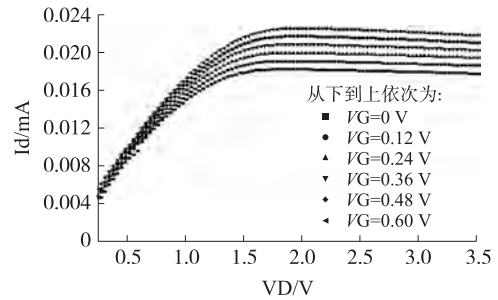


图2 PHEMT I-V 特性曲线

2.2 动态测试与分析

质量块受到一定外力作用时,漏极电流 I_D 会发生微小的变化,如果直接测试该变化比较困难,在测试电路(如图 3)中 PHEMT 结构串联一个阻值固定的电阻 R 。当有外力作用时, I_D 会发生相应的变化,流经电阻 R 的电流也会发生变化,从而引起 V_D 电压值的变化,通过差分放大器将此电压变化放大并测试,这样力的变化就转化为可测的电信号提取了出来。

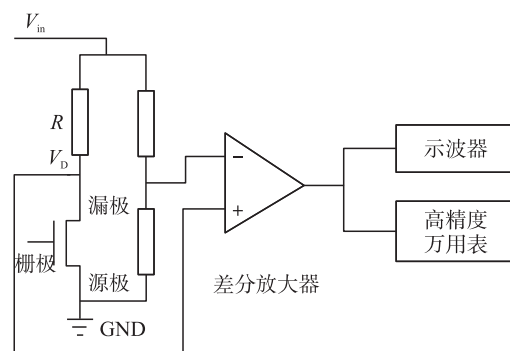


图3 测试电路示意图

固定漏压 V_D 和栅压 V_G ,漏极电流 I_D 的输出值会随不同的加速度值而产生变化,实验证明当受到一定压力时, $I-V$ 特性曲线会上升^[11]。同样,在相同的加速度条件下, V_D 和 V_G 的变化也会影响 I_D 的输出。 $I-V$ 特性曲线反应的是静态条件下漏极电流 I_D 和漏压 V_D 、栅压 V_G 的关系,而在动态测试条件下 I_D 和漏压 V_D 、栅压 V_G 的关系又是怎样的,与静态测试结果的一致性将直接关系到是否可以利用动态测试数据分析加速度计的灵敏度。

2.2.1 漏压 V_D 对输出的影响

实验采用 TV5200 振动台测试系统及其配套设备,BK 公司生产的加速度计 8305 作为标准加速度计,采用正弦振动方式来测试。用高强度双面胶将

加速度计固定在振动台的台面上,根据不同测试要求调节 PHEMT 结构的偏压和振动台参数。

振动台测试参数设为固定频率 600 Hz,加速度值 15 g_n ,栅压 V_G 为 0.6 V。用 Keithley 高精度万用表 2010 记录输出电压值,并将数据进行拟合分析,实验结果如下图 4 所示,从图中可以看出,在 V_D 小于 1.4 V 时,漏极输出电压随 V_D 的增加而缓慢增加;当 V_D 在 1.4 V - 2.2 V 变化时,PHEMT 由线性区逐渐进入饱和区,漏极输出电压急剧增大;当 V_D 大于 2.2 V 时,PHEMT 进入饱和区,漏极输出保持恒定,不再增加。而漏极电流 I_D 与漏极电压输出变化趋势是一致的,这与静态测试的 $I-V$ 曲线是一致的。

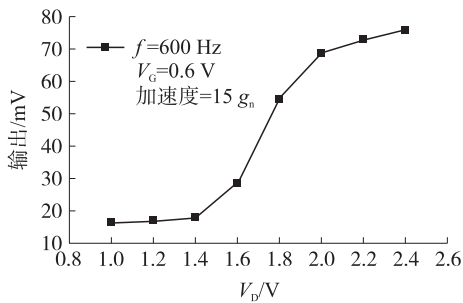


图 4 漏极输出与 V_D 的关系

2.2.2 栅压 V_G 对输出的影响

同样的,研究正栅压 V_G 的对漏极电压输出的变化的影响,将实验条件固定为频率 600 Hz,加速度值为 15 g_n ,漏压 V_D 分别为 2 V 和 1.2 V,由测试结果可以看出(如图 5),无论在饱和区还是线性区,PHEMT 漏极输出电压都随着栅压 V_G 的增大而减小,且在饱和区变化量比较大。根据图 3 的电路,漏极输出 V_{out} 定义为:

$$V_{out} = V_{in} - I_d * R \quad (1)$$

其中, V_{in} 是输入电压; R 是与 PHEMT 串联的电阻。

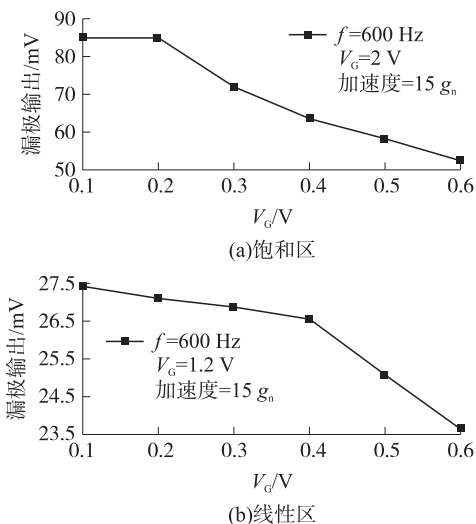


图 5 漏极输出与 V_G 的关系

由公式(1), V_{in}, R 保持不变, V_{out} 减小, 则漏极电流 I_D 会变大。也即,随着栅压 V_G 的增大, I_D 会增大,与静态测试的 $I-V$ 特性曲线一致。漏极电流变化与漏压栅压之间的关系在动态测试和静态测试下结果是一致的,这就为我们研究加速度计的线性特性和灵敏度提供了很好的依据。

2.3 线性特性及灵敏度分析

线性特性和灵敏度作为加速度计的两项参数,往往是加速度计性能好坏的重要技术指标,是人们研究的重点。由上面的分析,我们可采用振动台动态实验来标定 GaAs 基 PHEMT 嵌入式微加速度计的灵敏度,以及研究加速度计的线性特性。

由 I-V 曲线和动态测试的结果可以看出,PHEMT 结构在饱和区工作稳定,并且具有较大的漏极电流输出。调节 PHEMT 结构的偏压,其中源极接地,漏压 V_D 2 V,栅压 V_G 0.6 V。先将输出调零,即将惠斯通电桥调零,调节振动台的参数设置,选择正弦定频振动,频率 600 Hz(频响实验证明加速度计对 600 Hz 信号响应最好),设置不同的加速度值,振幅从 1 g_n 开始以步长 1 g_n 增长。经过外围测试电路进行信号处理及电压输出,用示波器实时显示测试的输出信号,并用 Keithley 高精度万用表 2010 记录输出电压值。多次实验结果表明加速度计在加速度值小于 20 g_n 的范围内是线性的,输出正弦波形完整,图 6 给出了示波器记录的通过外围电路测试的 HEMT 嵌入式加速度计的振动台电压输出信号,其中加速度值为 20 g_n ,放大倍数为 55 倍。

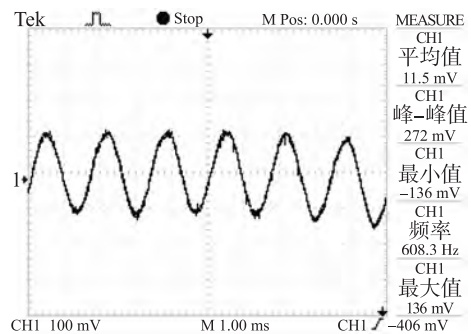


图 6 加速度计响应的正弦信号

将线性工作区(1 - 20 g_n)的实验数据用 origin 软件进行拟合,绘制出输出电压与加速度值之间的关系,结果如图 7 所示。图中可以看出,在饱和区加速度计具有良好的线性特性,经过计算灵敏度值为 0.177 mV/ g_n 。加速度计的线性区为小于 20 g_n ,这比设计值 200 g_n 小,分析原因可能是在微结构加工的过程中,悬臂梁结构存在加工误差,经过实际测试质量块厚度只有 75 μm ,比设计值 150 μm 少了一

半,这是导致量程和灵敏度减小的最直接的因素;另外,悬臂梁厚度为 $25\ \mu\text{m}$,比设计值 $20\ \mu\text{m}$ 增加了 $5\ \mu\text{m}$,这也是造成量程减小、灵敏度低的一个原因。另外,在测试过程中加速度计结构还存在阻尼,这些也会造成量程小及灵敏度低。

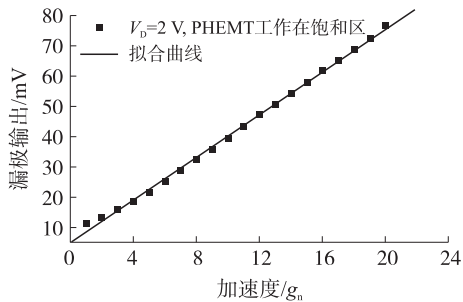


图7 饱和区加速度计的线性特性

同样的测试方法,研究PHEMT工作在线性区时加速度计的线性特性和灵敏度。调节测试电路,漏压 V_D 1.2 V,栅压 V_G 0.6 V,振动频率600 Hz,加速度值从 $1\ g_n$ 到 $20\ g_n$ 。实验结果如图8所示,在线性区内加速度计线性特性不及饱和区好,且灵敏度也没有饱和区高,只有 $0.039\ \text{mV}/g_n$ 。PHEMT工作在线性区没有在饱和区稳定。

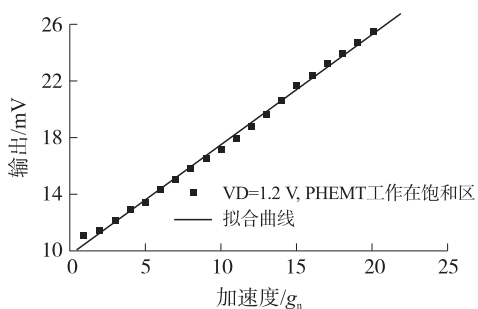


图8 线性区加速度计的线性特性

研究证明,当敏感单元PHEMT结构工作在饱和区,该传感器具有良好的线性特性和灵敏度,可作为压力传感器和加速度计使用。

3 结论

利用GaAs材料压阻效应,以GaAs基PHEMT为敏感单元而设计加工出一种新的加速度传感器结构。利用振动台实验标定加速度计的灵敏度,并由

外围电路测试PHEMT结构漏极输出电压的变化。动态测试结果表明,漏极电压随栅压的增加而减小;而随着漏压的增加呈现先缓慢增加,到达线性区急剧增加,在 V_D 大于2.2 V以后不再增加。而对应的电流变化关系则与静态测试 $I-V$ 特性结果保持一致。经测试加速度计具有好的线性特性和动态响应,在饱和区灵敏度为 $0.177\ \text{mV}/g_n$,可应用于加速度、压力、应力等测试的需求。

参考文献:

- [1] Mimura T, Hiyamizu S, Fujii Tetal[J]. Appl. Phys., 1980, 19: 225 - .
- [2] 张兴宏,夏冠群,徐元森. HEMT结构材料中二维电子气的输运性质研究[J]. 半导体学报, 1999, 20(4): 292 - 297.
- [3] 姜岩峰,谢孟贤. 微纳电子器件[M]. 化学工业出版社, 2005:118.
- [4] 曾树荣. 半导体器件物理基础[M]. 北京大学出版社, 2007: 149 - 160.
- [5] Lalinsky T, Drzlk M, Jakovenko J, et al. GaAs Based Micromachined Thermal Converter for Gas Sensors[J]. Sensors and Actuators A, 2008, 142: 147 - 152.
- [6] Boardman D A, Sellin P J. Design and Characterisation of High Electron Mobility Transistors for Use in a Monolithic GaAs X-ray Imaging Sensor[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2001, 466: 226 - 231.
- [7] Hung Ching-wen, Lin Han-lien, Chen Huey-ing, et al. Comprehensive Study of a Pd - GaAs High Electron Mobility Transistor (HEMT)-based Hydrogen Sensor[J]. Sensors and Actuators B, 2007, 122: 81 - 88.
- [8] Wang X H, Wang X L, Feng C, et al. Hydrogen Sensors Based on AlGaN/AlN/GaN HEMT [M]. Microelectronics Journal, 2008, 39: 20 - 23.
- [9] 孙金坛,陈军宁. GaAs MESFET的压力敏感特性[J]. 电子学报, 1994, 22(2): 89 - 91.
- [10] 谢自力,邱凯,尹志军,等. PHEMT结构材料及器件[J]. 微纳电子技术, 2002(2): 15 - 17.
- [11] Cui Jing, Zhang Bingzhen, Liu Jun, et al. Design of a Novel Sensor Based on Piezo-Resistive Effect of GaAs/AlGaAs/InGaAs PHEMT[C]//IEEE-NEMS, 2009.
- [12] Cheng Chin-chuan, Tsai Yan-ying, Lin Kun-wei, et al. Characteristics of a Pd - Oxide - In_{0.49}Ga_{0.51}P High Electron Mobility Transistor(HEMT)-Based Hydrogen Sensor[J]. Sensors and Actuators B., 2006, 113: 29 - 35.



贾晓娟(1984 -),女,硕士研究生。主要从事微系统设计及测试计量工作, xiaokui84@163.com;



张斌珍(1974 -),男,副教授、硕士生导师。学术研究主要集中在微纳机电系统(MEMS/NMEMS)和武器系统恶劣环境下的动态测试技术。先后在国际、国内的重要学术刊物发表相关学术论文14篇,被SCI/EI检索8篇。