

文章编号: 1000-7032(2012)04-0449-04

ZnO/ZnMgO 异质结场效应管的制备与性能研究

朱振邦, 顾书林*, 朱顺明, 叶建东, 黄时敏, 顾 然, 郑有料
(南京大学 电子科学与工程学院和南京微结构国家实验室, 江苏 南京 210093)

摘要: 利用等离子体增强化学气相沉积(PECVD)技术,在 ZnO/ZnMgO 异质结构上制备 SiO₂ 作为栅绝缘层,采用光刻与腐蚀工艺制备 ZnO/ZnMgO 异质结场效应管。电学性能测试及计算结果表明器件栅压调控作用明显。发现栅端漏电流对器件性能造成一定影响。在低温条件下,栅绝缘层产生钝化,从而能够改善器件的性能。

关键词: ZnO/ZnMgO; 异质结场效应管; 迁移率

中图分类号: TN386 文献标识码: A DOI: 10.3788/fgxb20123304.0449

Fabrication and Characteristics of ZnO/ZnMgO Heterostructure Field-effect Transistor

ZHU Zhen-bang, GU Shu-lin*, ZHU Shun-ming, YE Jian-dong,
HUANG Shi-min, GU Ran, ZHENG You-dou

(National Laboratory of Solid State Microstructures and School of Electronic Science & Engineering,
Nanjing University, Nanjing 210093, China)

* Corresponding Author, E-mail: slgu@nju.edu.cn

Abstract: The characteristics of a ZnO/ZnMgO heterostructure field-effect transistor (HFET) were reported in this paper. The HFET was grown on α -plane sapphire substrate by metal-organic vapor phase epitaxy (MOVPE) technology, and was fabricated by a conventional photolithography technique combined with wet etching. The experiment results indicated that the HFET was an n-channel depletion type with a transconductance of $180 \mu\text{S} \cdot \text{mm}^{-1}$ and mobility of $182 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ at room temperature. The property was limited by leakage current through the SiO₂ gate insulator. At low temperature, the performance was improved due to the reduced leakage current.

Key words: ZnO/ZnMgO; heterostructure field-effect transistor(HFET); mobility

1 引 言

ZnO 是一种纤锌矿结构直接带隙半导体,室温下带隙宽度为 3.37 eV,激子束缚能为 60 meV (远高于室温热动能 26 meV),可望实现室温激子复合辐射,为新型短波长激子型半导体激光器的

研制提供了可能。与 GaN 相比,ZnO 衬底材料的选择范围更大,生长温度更低。ZnO 和其他氧化物一样具有很高的化学稳定性和耐高温性能,而且来源丰富、价格低廉,这些优点使得 ZnO 成为制备光电子器件的优良材料,在透明电极、透明薄膜晶体管等领域具有很好的应用前景^[1-2]。

收稿日期: 2011-12-07; 修订日期: 2012-02-17

基金项目: 国家自然科学基金(61025020, 60990312); 国家“973”计划项目(2011CB302003); 江苏省自然科学基金(SBK201121728)资助项目

作者简介: 朱振邦(1985 -),男,吉林松原人,主要从事 ZnO 基光电器件制备的研究。

E-mail: abang985@163.com

ZnO/ZnMgO 异质结构以及二维电子气(2DEG)是最近研究的一个热点。ZnO 基半导体作为极性半导体,具有较强的压电极化和自发极化效应,因此,ZnO/ZnMgO 的异质界面存在较强的极化场^[3],可以在异质界面处感应出具有高迁移率的二维电子气,非常适合于研制高性能的场效应晶体管^[4]。通过调制 ZnMgO 中 Mg 的含量,在低温条件下可以得到极高的电子迁移率^[5]。据文献[6-7]报道,在高迁移率的二维电子气中还成功地观察到了整数及分数量子霍尔效应(QHE)。目前,Koike、Tsukazaki 和 Tampo 三个科研小组在 ZnO/ZnMgO 异质结构以及二维电子气方面的论文成果居多。Tsukazaki 组在 2011 实现了可调控 Mg 组分的异质结,在 Mg 组分为 0.01、温度为 0.5 K 时,最高迁移率达到了 $7 \times 10^5 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[5]。

本文成功制备了 ZnO/ZnMgO 异质结场效应管。电学测量显示,器件具有明显的二维电子气特征以及良好的栅压调控作用。

2 实 验

使用 MOVPE 设备,以二甲基锌为锌源、 $(\text{MeCp})_2\text{Mg}$ 为镁源、 N_2O 为氧源、氮气为载气,

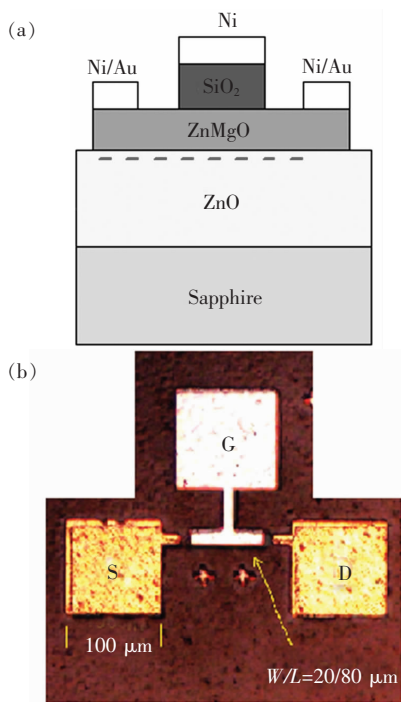


图 1 场效应管剖面示意图(a)和显微镜实物图(b)

Fig. 1 Schematic (a) and top view (b) of the HFET reported in this experiment

920 °C 条件下在蓝宝石(0001)衬底上生长 ZnO/ZnMgO 异质结^[3]。使用 PECVD 设备,300 °C 条件下在样品表面生长 150 nm 厚的 SiO_2 作为绝缘层。采用光刻与腐蚀工艺,刻出场效应管图形,覆盖有 SiO_2 的沟道层宽长比为 $W/L = 20/80 \mu\text{m}$ 。为实现欧姆接触,采用电子束蒸发方法,在源、漏端淀积 Ni/Au 薄膜 60/20 nm 作为电极。 I - V 测试结果显示源漏电极与 ZnMgO 层形成了欧姆接触。栅端用同样方法制备 80 nm 厚的 Ni 薄膜作为电极。

器件实物图、电学特性和样品迁移率分别采用光学显微镜、 I - V 测试仪、变温霍尔(Hall)测量装置等进行测量分析。

图 1(a)为场效应管结构示意图,ZnO 层厚 3.3 μm ,ZnMgO 层厚 60 nm。二维电子气在 ZnO 与 ZnMgO 界面处形成,并受到栅压的调控,从而控制器件开启和关断。图 1(b)为器件实物图。

3 结果与讨论

3.1 场效应管电学特性分析

图 2 为场效应管室温输出特性曲线,可以看出器件为 n 型耗尽型场效应管,具有良好的栅压调控特性。器件的关断电压 $V_T = -2 \text{ V}$,器件在栅压低于 V_T 时关断,高于 V_T 时开启。在栅压从 -1 V 增加到 7 V 的过程中,饱和电流随栅压增加而增大,具有良好的输出特性。

观察曲线还发现,在栅压 V_G 从 -1 V 变化到 4 V 的过程中, I - V 曲线的间隔逐渐变小,即随着栅压增大,饱和电流增加的速率逐渐减小;然而,在栅压从 4 V 变化到 7 V 的过程中, I - V 曲线的间隔逐渐增大,也就是饱和电流随栅压增加的速度变大。这是一种反常的实验现象。经过分析认为,

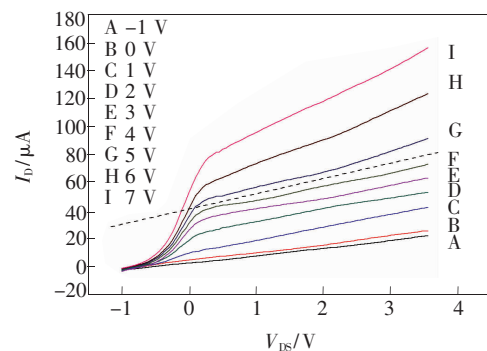


图 2 场效应管的室温输出特性曲线

Fig. 2 I_D - V_{DS} characteristics of the HFET measured at RT

这是由于栅绝缘层 SiO₂ 漏电流对其造成的影响。图 3 是 V_D = 2.5 V 时测量的 I_D-V_{GS} 转移特性曲线和栅端漏电流。从图 3 可以看出, 在栅压较大时, 漏电流随栅压增加而迅速增大, 漏电流叠加在源漏电流上, 就造成了上述反常现象。栅绝缘层 SiO₂ 的质量对器件性能有着显著的影响, 若 SiO₂ 杂质和缺陷比较多, 就会产生明显的漏电现象, 降低器件的性能。

图 4 是扣除栅端漏电流之后的室温转移特性

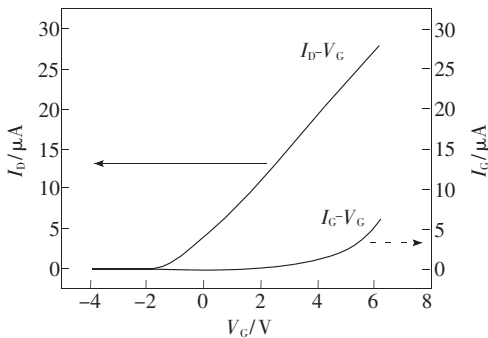


图 3 场效应管室温转移特性曲线和栅端漏电流

Fig. 3 I_D-V_{GS} characteristics and leakage current from gate insulator of the HFET measured at RT

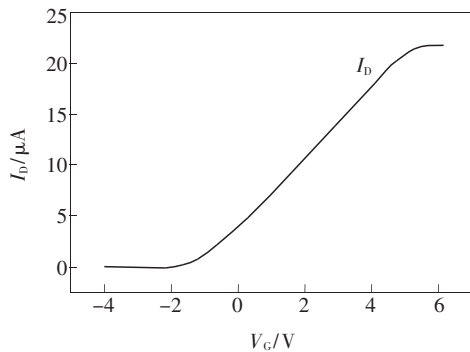


图 4 场效应管室温转移特性曲线(扣除栅端漏电流)

Fig. 4 I_D-V_{GS} characteristics (leakage current deducted) of the HFET measured at RT

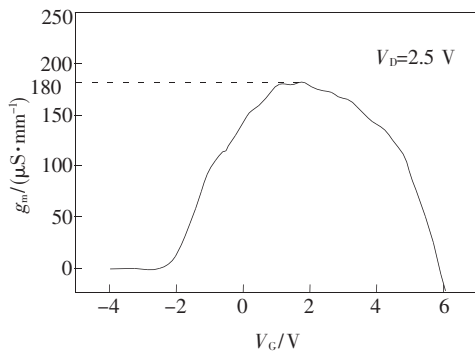


图 5 场效应管室温跨导曲线

Fig. 5 Transconductance of the HFET at RT

曲线, 跨导反映了栅电压对源漏电流的控制能力。在 V_G = 2 V 范围内, 跨导达到最大值, 为 180 μS · mm⁻¹, 说明器件具有良好的栅压调控作用。对曲线求微商得到跨导曲线如图 5 所示, 根据公式

$$g_m = \frac{WC'_{ox}\mu(V_{GS} - V_T)}{L}, \quad (1)$$

可求出迁移率。计算得出迁移率 μ = 182 cm² · V⁻¹ · s⁻¹, 显示 2DEG 具有高迁移率的特性。

3.2 场效应管变温迁移率分析

图 6 是场效应管变温跨导曲线。从图中可以看出, 在较高温度下, 栅漏电流导致的电流增加现象明显, 从而导致不可靠的跨导增大; 而低温下的跨导变化则比较规则, 说明器件性能在低温条件下得到了改进, 这是由于栅绝缘层低温性能的改进大大降低了栅漏电流的结果。

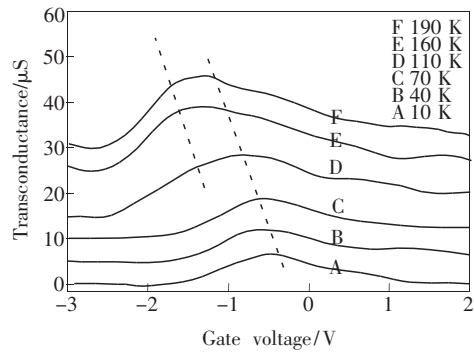


图 6 场效应管变温跨导曲线

Fig. 6 Temperature dependence of transconductance of HFET

图 7 为场效应管迁移率与温度的关系曲线。曲线 A 是从刚制备出的样品 A 测得的霍尔迁移率, 曲线 B 是放置一年之后的样品 B 的霍尔迁移率。可以看出, 样品长时间暴露在空气中, 形成的表面态对 2DEG 的运输特性以及浓度都产生了影

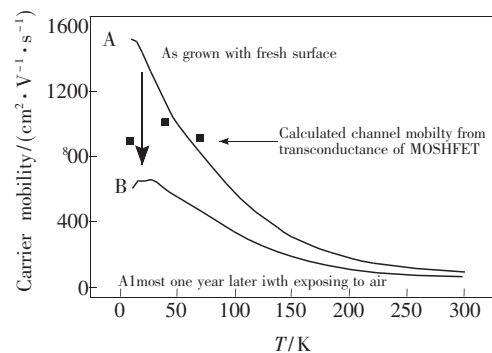


图 7 场效应管迁移率与温度的关系

Fig. 7 Temperature dependence of the electron mobility (μ) of the samples

响。温度越低,器件的沟道迁移率就越高,说明低温下 SiO_2 表面的钝化效应可能对器件性能有所改进,使之提高。B. Jogai 在文献[9]中指出:表面态会对 2DEG 浓度产生影响,2DEG 来源于表面施主电荷,而表面钝化效应降低了施主离子能级,从而增加了 2DEG 浓度。同时,长时间与空气接触使得样品与氧气发生反应,导致样品杂质浓度增加,电离杂质散射作用使得迁移率有所下降。

4 结 论

制备了具有调控作用的 ZnO/ZnMgO 异质结场效应管,对器件进行了电学性能测试,计算了 2DEG 迁移率。栅端漏电流对器件性能有显著的影响,低温下 SiO_2 的表面钝化效应可以降低漏电流,改进并提高器件的性能及 2DEG 特性。

参 考 文 献:

- [1] Hoffman R L, Norris B J, Wager J T. ZnO-based transparent thin-film transistors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, 82(5): 733-735.
- [2] Masuda S, Kitamura K, Okumura Y, *et al.* Transparent thin film transistors using ZnO as an active channel layer and their electrical properties [J]. *J. Appl. Phys.*, 2003, 93(3):1624-1630.
- [3] Ye J D, Pannirselvam S, Lim S T, *et al.* Two-dimensional electron gas in Zn-polar ZnMgO/ZnO heterostructure grown by metal-organic vapor phase epitaxy [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, 97(11):111908-1-3.
- [4] Sasa S, Ozaki M, Koike K, *et al.* High-performance ZnO/ZnMgO field-effect transistors using a hetero-metal-insulator-semiconductor structure [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 89(5):53502-1-3.
- [5] Joseph F, Denis M, Yusuke K, *et al.* Magnesium doping controlled density and mobility of two-dimensional electron gas in $\text{Mg}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}/\text{ZnO}$ heterostructures [J]. *Appl. Phys. Express*, 2011, 4(9):091101-1-3.
- [6] Tsukazaki A, Ohtomo A, Kita T, *et al.* Quantum Hall effect in polar oxide heterostructures [J]. *Science*, 2007, 315(5817):1388-1391.
- [7] Tsukazaki A, Akasaka S, Nakahara K, *et al.* Observation of the fractional quantum Hall effect in an oxide [J]. *Nat. Mater.*, 2010, 9(11):889-893.
- [8] Liu Bingce, Liu Cihui, Sun Lijie, *et al.* Influence of ZnO microstructure variation on its photoelectricity characteristics [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2010, 31(2):194-198 (in Chinese).
- [9] Jogai B. Influence of surface states on the two-dimensional electron gas in AlGaIn/GaN heterojunction field-effect transistors [J]. *J. Appl. Phys.*, 2003, 93(3):1631-1635.
- [10] Chen Hui, Gu Shulin, Zhu Shunmin. Influence of different substrate and pressure on growth and properties of ZnMgO films [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2011, 32(5):482-486 (in Chinese).
- [11] Su Shichen, Lv Youming. Ultraviolet electroluminescence of ZnMgO/nZnO/ZnMgO/pGaIn heterojunction light emitting diode [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2011, 32(8):821-824 (in Chinese).