

AlGaAs/InGaAs/GaAs 赝配高电子迁移晶体管的 kink 效应研究*

刘红侠[†] 郝 跃 张 涛 郑雪峰 马晓华

(西安电子科技大学微电子研究所, 西安 710071)

(2002 年 7 月 30 日收到, 2002 年 9 月 4 日收到修改稿)

利用二维器件模拟软件 MEDICI 对 AlGaAs/InGaAs/GaAs 赝配高电子迁移晶体管器(PHEMT)件进行了仿真, 研究了 PHEMT 器件的掺杂浓度与电子浓度分布, PHEMT 器件内部的电流走向及传输特性, 重点研究了不同温度和不同势垒层浓度情况下 PHEMT 器件的 kink 效应. 研究结果表明, kink 效应主要与处于高层深能级中的陷阱俘获/反俘获过程有关, 而不是只与碰撞电离有关.

关键词: 高电子迁移率晶体管, kink 效应, 二维电子气

PACC: 7360L, 7280E, 7300, 7220J

1. 引 言

目前, 高电子迁移率晶体管(high electron mobility transistor 缩写为 HEMT)被公认为微波/毫米波器件和高速应用器件的电路领域中最有竞争力的三端器件^[1-4]. HEMT 的结构与工作原理同 metal-semiconductor field-effect transistor(缩写为 MESFET)是相似的, HEMT 优于 MESFET 的关键所在是导电沟道不掺杂, 导电沟道中的电子由高掺杂的 AlGaAs 层提供, 因而避免了杂质对载流子的散射, 具有很高的电子迁移率. 这个特点使它不仅具有优异的噪声特点, 而且具有出色的功率性能. HEMT 的问世是半导体超晶格研究中的一个重要的里程碑.

对于 AlGaAs/GaAs HEMT, 用未掺杂的 InGaAs 替代二维电子气(two-dimensional electron gas 缩写为 2DEG)层的材料 GaAs 给 HEMT 带来了一系列好处. 首先, InGaAs 中的电子迁移率和电子的漂移速度比 GaAs 中的高得多, 有利于提高器件的工作频率和速度. 另外, 在量子阱界面处有较大的导带底不连续性, 有利于提高 2DEG 层的电子浓度. 特别是 20 世纪 90 年代采用平面掺杂和双异质结掺杂对赝配 HEMT 的电子提供层进行改善, 在功率方面又高了

一个台阶. 但是 InGaAs 的晶格常数明显高于 GaAs, 从而导致晶格的 PHEMT (pseudomorphic HEMT 缩写为 PHEMT), PHEMT 中晶格失配带来了一些新的问题, 如 AlGaAs/InGaAs 结构中的未知深能级-DX 中心问题, AlGaAs/InGaAs 中的跨导和输出电导的低频偏移效应. 这些效应严重影响了 HEMT 在不同电压和不同频率下的应用.

本文首先介绍 PHEMT 的形成基础、基本结构, 理论说明其特殊的导电沟道. 用 MEDICI 模拟 PHEMT 的掺杂与电子分布、内部的能带结构、电流走向及其传输特性, 分析了原因. 为了证明陷阱和碰撞电离在 kink 效应中所起的作用大小, 模拟了 PHEMT 的 kink 效应, 分析了 kink 效应发生的原因.

2. PHEMT 器件的电学特性

以典型的 PHEMT 器件为例, 用 Avant 公司的二维器件模拟软件 MEDICI 进行仿真, 说明 PHEMT 器件的内部机理. 图 1 为 PHEMT 器件的结构图. 其中帽层(cap layer) n 型 GaAs 浓度为 $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, 势垒层的 n 型 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 浓度为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 隔离层 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$, 沟道层 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$, 缓冲层和衬底均为人为不掺杂.

* 国防预研基金(批准号: 00J8.4.3DZ01)资助的课题.

[†] 联系人: Tel: 029-8202073(O), 029-8201627(H), 13071671175, Fax: 029-8201641, E-mail: hxlxliu@mail.xidian.edu.cn

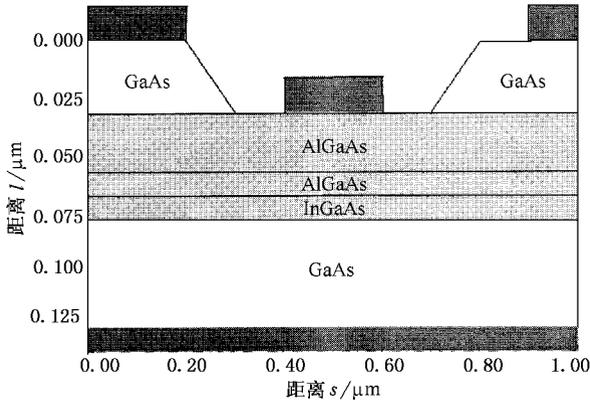


图 1 PHEMT 器件的结构图

2.1. PHEMT 掺杂浓度与电子浓度分布

PHEMT 器件的掺杂与电子浓度分布如图 2 所示。从图 2 可以看出,原本掺杂浓度很高的势垒层电子浓度降低,而不人为掺杂的沟道层电子浓度增高,这是由于栅极是肖特基接触的缘故。金属的功函数大于半导体的功函数,当金属与半导体没有接触时,半导体的费米能级(E_F)_s要高于金属的费米能级(E_F)_m。当金属与半导体接触时,它们就形成统一的电子系统,由于原来(E_F)_s高于(E_F)_m,半导体中的电子将向金属流动,使金属表面带负电,半导体表面带正电,它们所带的电荷在数值上是相等的,整个系统仍然保持电中性,结果降低了金属的电势,升高了半导体的电势。电势变化时,金属和半导体内部所有电子能级和表面的电子能级都发生了相应的调整,随着电子从半导体流向金属中,金属表面不断积累负电荷,半导体表面存在数量相等的正电荷,这种正电荷分布在半导体表面相当厚的一层表面层,即空间电荷区,这时在空间电荷区存在一定的电场,造成能带弯曲,使半导体表面与内部之间存在电势差,即表面势。金属与半导体的电势差(接触势)分为两部分,一部分落在空间电荷区,另一部分落在金属与半导体之间。当金属与半导体之间是良好接触时,它们之间不再有电势,这时,接触电势差全部落在半导体表面的空间电荷区内。

Ⅲ-V 族三元合金的禁带宽度和组分有如下关系:

$$E_g = a + bx + cx^2, \quad (1)$$

对于 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, $E_g = 1.424 + 1.247x$; 对于 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, $E_g = 1.424 - 1.064x$, 于是

$$E_g |_{\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}} = 1.424 + 1.247x = 1.673 \text{ eV}, \quad (2)$$

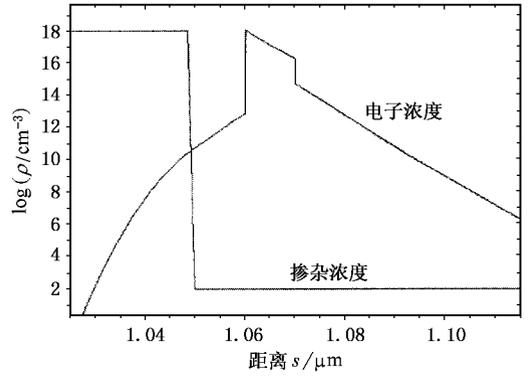


图 2 PHEMT 器件的掺杂与电子浓度分布

$$E_g |_{\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}} = 1.424 - 1.064x = 1.264 \text{ eV}. \quad (3)$$

由于禁带宽度不同, $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 和 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ 形成的突变异质界面产生了势阱和势垒,宽禁带半导体中的自由电子流向窄禁带半导体中,由于量子效应和空间电荷效应使电子堆积在薄层区域,原本不人为掺杂的沟道层出现了二维电子气。在 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ 界面,导带和价带明显不连续。

2.2. PHEMT 器件的传输特性

PHEMT 器件内部的电流分布如图 3 所示。由图 3 可以看出,器件电流仅仅由 2DEG 的流动确定。PHEMT 器件实际存在两个导电沟道(2DEG 传导沟道与 AlGaAs 传导沟道)。当栅电压为零偏压或非常接近零偏压时,AlGaAs 层是整个耗尽的,只存在 2DEG 电流,这时可获得最高的器件跨导,2DEG 得到充分利用。AlGaAs 未全部耗尽时,在 n 型 AlGaAs 层上将出现导电沟道。

PHEMT 器件的转移特性如图 4 所示($V_d = 0.1\text{V}$)。由图 4 可以看出,PHEMT 大约在 -0.2V 器件开始导通。在比较高的栅电压处,转移特性曲线的斜率减少,这是由于高栅压下,沟道中的电子被拉出势阱,这些电子沿着高掺杂的隔离层的上边界移动,因此,迁移率降低。

PHEMT 器件的输出特性如图 5 所示。由图 5 可以看出,对于耗尽型 PHEMT 器件, V_{gs} 由零开始,负压逐步增大,器件由导通变为截止。

3. PHEMT 的 kink 效应

对 InGaAs 沟道晶体管的 kink 效应研究已经有

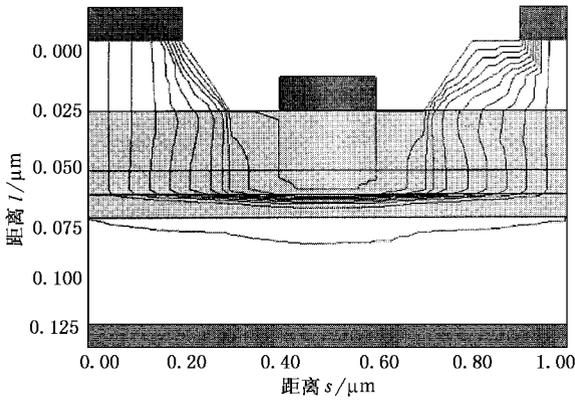


图 3 PHEMT 器件内部的电流分布图

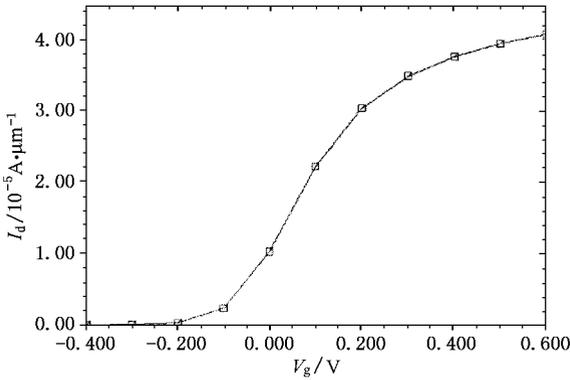


图 4 PHEMT 器件的 I_d 与 V_g 曲线 ($V_d = 0.1V$)

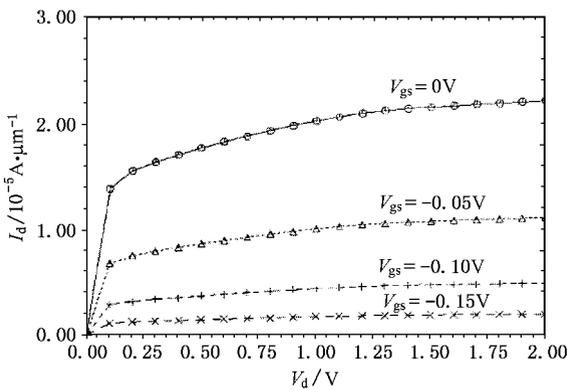


图 5 PHEMT 器件的 I_d 与 V_d 曲线

许多报道,但是这种效应的起因还存在争论.一些报道认为,kink 效应是由于碰撞电离引起的^[5,6],另外一些报道则认为,kink 效应是由于陷阱引起的^[7,8].实验结果表明 kink 效应是一个复杂的现象:它与温度、频率、光照、组分等因素有关.它在低频(10—100Hz)开始不明显,频率增加时消失;它可以通过氮

化硅钝化来抑制;当器件加热时 kink 效应消失不见.碰撞电离与 kink 效应存在一定的关系.为了说明 kink 效应的产生机理,本实验分别在不同温度下和不同势垒层掺杂浓度情况下,测量了 PHEMT 器件的漏极电导和栅电流特性,定性解释了 PHEMT 器件的 kink 效应.

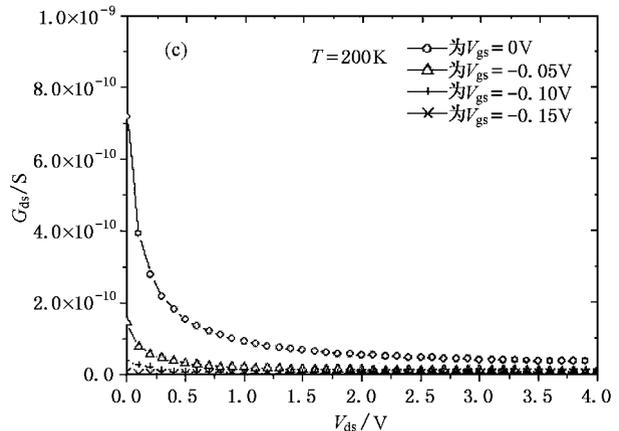
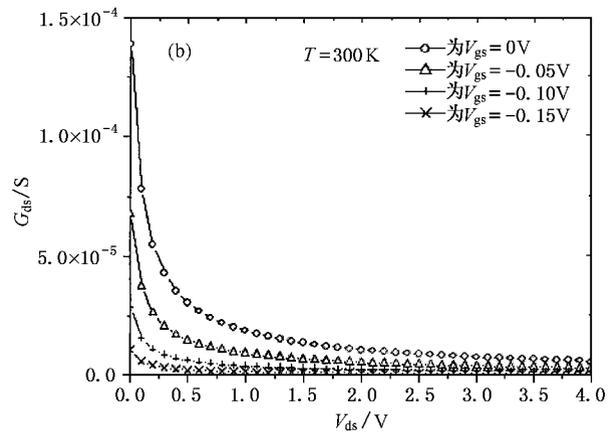
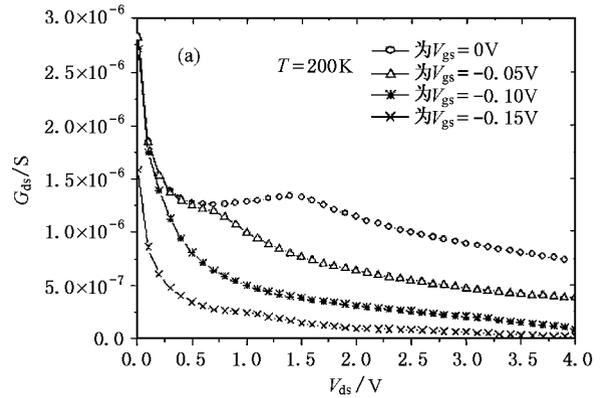


图 6 在不同温度下 HEMT 器件的 kink 效应 (a) (b) 势垒层 AlGaAs 的浓度为 $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ (c) 势垒层 AlGaAs 的浓度为 $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$

3.1. MEDICI 模拟 kink 效应

图 6(a) 和图 6(b) 显示的是在温度分别为 200 和 300K 时, 漏极电导 G_{ds} 的变化曲线, 在 200K 时, 对于 $V_{gs} = 0V$ 对应的曲线, G_{ds} 在 1.5V 左右达到峰值, 并随着 V_{gs} 的减小, 发生 kink 效应的电压也随之减小. 但是对于温度为 300K 时, 漏极电导 G_{ds} 的变化曲线, 几乎观察不到 kink 效应. 说明 kink 效应强烈依赖于温度, 温度越高, kink 效应越不明显, 并且 kink 效应发生点与 V_{gs} 有关, V_{gs} 越小, kink 效应发生的电压越小.

图 6(a) 和图 6(c) 显示的都是 200K 时漏极电导 G_{ds} 曲线, 两者的差别在于图 6(a) 势垒区掺杂浓度为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 而图 6(c) 势垒区掺杂浓度为 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, 图 6(a) 发生 kink 效应, 图 6(c) 未发生 kink 效应, 说明 kink 效应发生与否和势垒区的掺杂浓度有关, 势垒区的掺杂浓度越高, 越容易发生 kink 效应.

3.2. 论证 kink 效应发生的原因

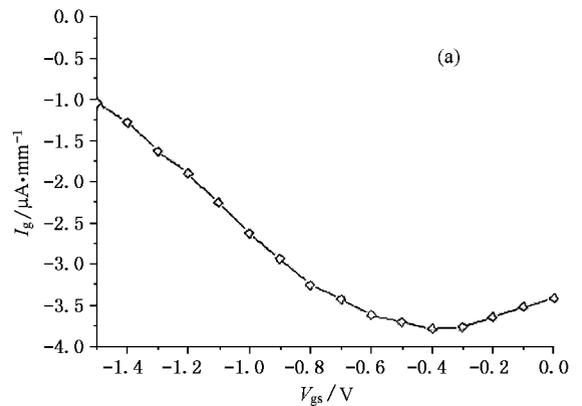
存在一种普遍的假设, 高电场 InGaAs 沟道发生的碰撞电离产生 kink 效应. 由碰撞电离产生的空穴流向源区, 形成空穴的积累引起源区电阻的下降和 I_{ds} 的增加.

为了弄清在 kink 效应中碰撞电离的作用, 模拟了随温度变化的栅电流. 在图 7(a) 和图 7(b) 中, 栅电流表示成 V_{gs} 的曲线, I_g 曲线的“漏斗”型就是碰撞电离清晰的证据. 栅漏电流有两个重要的来源: 在夹断区 ($V_{gs} = -1.5V$) 附近时, I_g 主要是肖特基电流, 而在正常工作区, I_g 主要为碰撞电离电流. 从图 7 中可以看到, 肖特基电流随着温度增加而增加, 碰撞电离电流随温度增加稍微减少. 由于势垒层的作用, 只有一部分碰撞电离产生的空穴可以达到栅极, 栅电流与碰撞电离密切相关. 因此, 可以用栅电流估计碰撞电离的过程^[9]. kink 效应的开始与栅电流的上升一致, 这说明 Kink 效应中一定包含碰撞电离. 但是从实验中可以观察到在温度为 300K 时, I_g 中碰撞电离的成分大约占 25%, 小于温度为 200K 时的比例. 这说明在 $T = 300K$ 时, 仍然存在碰撞电离, 但是却没有发生 kink 效应. 对比的结果表明 kink 效应的原因不能只归结为器件中的碰撞电离.

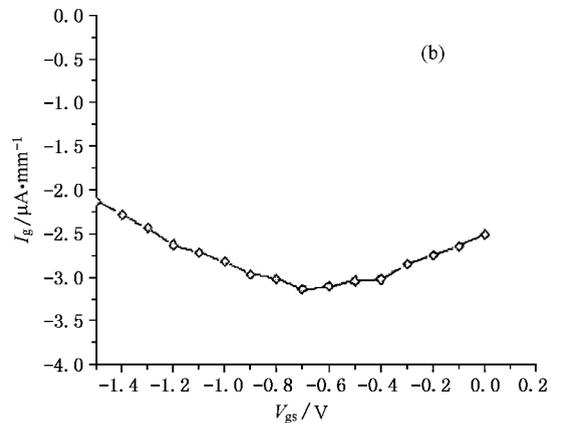
高温或增加频率时 kink 效应的消失是根据俘获/反俘获机理解释的. 在这个模型中, kink 效应与

低温时 $V_{ds} < V_{kink}$ 空穴填充陷阱产生寄生空间电荷区有关. 这些陷阱在 $V_{ds} > V_{kink}$ 时是空的, 引起 I_{ds} 的增加. 因此, kink 效应可以由碰撞电离和深能级陷阱的俘获/反俘获过程这两个可能的机理来描述.

由碰撞电离产生的一些空穴传输到势垒层, 它们中的一部分可以借助占据的能级再复合. 这种能级通常在 E_c 以下 0.47eV, 充当陷阱, 起复合中心的作用. 在高温情况下, 这些能级的发射率足够高, 空穴不能被这种复合中心俘获, 即在高温时陷阱未被占据, 它们就会对空间电荷区毫无影响地扩散到栅极, 所以观察不到 kink 效应.



(a) 为 $T = 200K$ 时



(b) 为 $T = 300K$ 时

图 7 I_g 随 V_{gs} 的变化曲线

4. 结 论

本文通过对 AlGaAs/InGaAs/GaAs PHEMT 器件进行模拟, 分析了 PHEMT 器件的能带结构, 解释了

二维电子气存在的原因,其电流走向、输出特性,均与实验符合良好.在此基础上,进一步模拟了 PHEMT 器件的 kink 效应,分析了 kink 效应产生的机理,指出 kink 效应主要与位于高层深能级的俘获/反

俘获过程有关,而不是只与碰撞电离有关.碰撞电离在离化瞬间和那些能级稳定的电荷状态起作用.这就很好地解释了 kink 效应的开始与在 I_g 与 V_{gs} 特性曲线上观察的碰撞电离的开始之间的联系.

- [1] Su J , Hsu W C , Lin W and Jain S Y 1998 *IEEE Electron Dev. Lett.* **19** 195
- [2] Brogarino M , Menozzi R , Baeyens Y *et al* 1998 *IEEE Trans. Electron Dev.* **45** 366
- [3] Somerville M H , Blanchard R , Alamo J A *et al* 1998 *IEEE Electron Dev. Lett.* **19** 405
- [4] Zhong Y G , Shen B , Liu J *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1774 [in Chinese] 周玉刚、沈波、刘杰 2001 *物理学报* **50** 1774]
- [5] Pearson J L , Halland M C , Stanley C R *et al* 1999 *J. Crystal Growth* **201/202** 757
- [6] Matsunaga K , Okamoto Y , Kazuhara M 1995 *IEEE MTT-S Digest* **2** 335
- [7] Halland M C , Skuras E and Davies J H 1995 *J. Crystal Growth* **150** 1215
- [8] Pilorenzo J V , Lauterwasser B and Zaitlin M P 1997 *J. Crystal Growth* **175/176** 1
- [9] Somerville M H , Alamo J A and Hoke W 1996 *IEEE Electron Dev. Lett.* **17** 473

Study on the kink effect in AlGaAs/InGaAs/GaAs PHEMTs *

Liu Hong-Xia Hao Yue Zhang Tao Zheng Xue-Feng Ma Xiao-Hua
 (Microelectronics Institute , Xidian University , Xi ' an 710071 , China)
 (Received 30 July 2002 ; revised manuscript received 4 September 2002)

Abstract

In this paper , two-dimensional devices simulation program-MEDICI has been used to simulate AlGaAs/InGaAs/GaAs pseudomorphic high electron mobility transistors (PHEMTs). Doping and electron concentrations , current flow and gate characteristic in PHEMTs are studied. The kink effect in PHEMTs is investigated emphatically as a function of temperature and doping concentration of Schottky layer. The results show that the kink effect is related mainly to the trapping/detrapping process of deep levels that lie in the top layers but not related to the impact ionization alone.

Keywords : high electron mobility transistor , kink effect , two-dimensional electron gas

PACC : 7360L , 7280E , 7300 , 7220J

* Project supported by National Defence Pre-Research Foundation of China (Grant No. 00J8.4.3DZ01).