

凹源结构场效应晶体管

潘 晓 明

(南京固体器件研究所)

1984年5月3日收到

提出了一种新型的凹源结构场效应晶体管(简称 RSFET)。对 RSFET 进行了二维计算机模拟,并与其它结构的场效应晶体管进行了比较。

一、引言

对 GaAs MESFET 工作机理进行的理论研究和实验分析都表明,为了得到尽可能小的噪声系数和高的截止频率,最根本的是缩短栅长和把寄生的栅电阻和源电阻减到最小。目前的微波 GaAs MESFET 的设计与制作已按此方向作出了努力,并取得了很大的进展。随着应用对器件提出的越来越高的要求,必须进一步降低噪声系数和提高截止频率。当前,一般的微波 GaAs MESFET 栅长已在 0.5 微米左右。由于缩短栅长与减小栅电阻有矛盾,这个矛盾虽可通过缩短单根栅宽加以折衷解决,但进一步减小栅长,除了存在工艺上的困难之外,理论分析表明:当栅长减小时,最小噪声系数下降,但当寄生串联电阻较大时,这一作用就不明显了。即使把栅长降低到 0.4 微米以下,最小噪声系数也不会有实际的改进。实际上,寄生串联电阻的影响是主要的^[1]。降低栅、源寄生电阻是实现 MESFET 高性能的又一关键所在。采用凹槽栅结构,使 GaAs MESFET 性能获得了较大的改进。在此同时,人们也提出了各种各样的新结构,试图从结构的改进来进一步提高 MESFET 的性能。凹源结构场效应晶体管就是在这种想法下提出来的。本文将 RSFET 和传统结构的 MESFET 进行了比较,并对 RSFET 二维分析的结果进行了讨论。

二、凹源场效应晶体管的结构

凹源场效应晶体管的结构示于图 1,相似结构的台面栅 FET 和背源 FET 也示于图 1。为了便于比较,现行的几种主要结构示于图 2。之所以取名为“凹源场效应晶体管”,除了其外形上源电极相对于栅、漏电极确是凹下的外,也是为了和众所周知的凹槽栅 FET 相对应。

图 1(a)示出了典型的凹源结构场效应晶体管。其主要特点是:源电极和栅电极不在同一平面内,它是制作在直接延伸到栅下沟道附近的 n⁺⁺ 层上。虽然源电极和栅电极几何间距为 L₀(见图 3),但电学上实际间距近似为零,就好象源电极制作在栅下沟道的底部一般,这就大大地降低了源-栅寄生电阻。

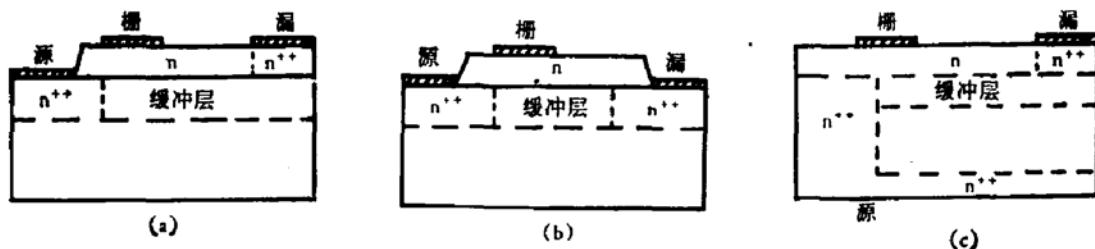


图 1 凹源场效应晶体管及其派生结构

(a) 凹源 FET (b) 台面栅 FET (c) 背源 FET

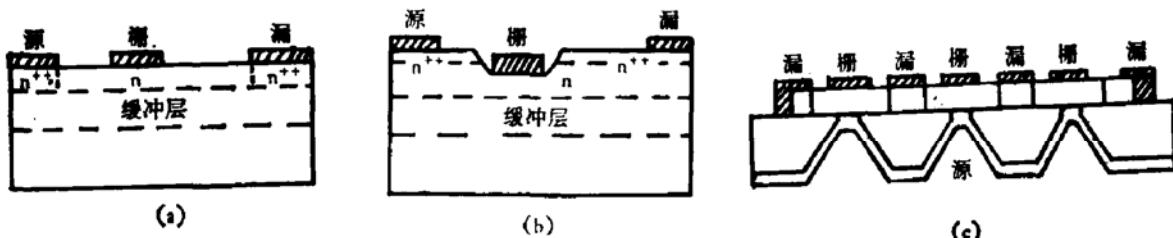


图 2 流行的 MESFET 结构

(a) 平面结构 (b) 凹槽栅结构 (c) 源栅对置晶体管 (OGST)

凹源结构的延伸便是台面栅场效应晶体管,它的结构示于图 1(b). 其外形颇象双极晶体管的台面管. 这种结构可能在要求得到高漏栅击穿电压、低耗散功率的领域有其诱人的应用前景.

图 1(c)示出了背源场效应晶体管结构,这种结构有利于进一步降低源引线电感,同时在电路应用上带来许多方便.

限于篇幅,本文仅对凹源结构进行讨论,其余结构的分析将在今后陆续进行.

RSFET 的主要制作工艺简述如下: 首先在 GaAs 缓冲层上有选择地离子注入源的隐埋层,然后低温外延生长有源层,腐蚀掉源电极上的有源层,然后分别制作源、漏电极和栅电极. n^{++} 区和缓冲层之间的界线,可通过在离子注入前将非注入区进行微腐蚀,以形成一台阶,供外延有源层后光刻对准用. 需特别指出的是,栅电极的左端点并不一定要严格对准隐埋层的右端点(即图 3 中的 L_0 与 L_1 ,并不一定要严格相等).

凹源结构场效应晶体管与其它几种结构的 MESFET 比较情况列于表 1.

表 1 RSFET 与其它结构 MESFET 比较

结构名称	RSFET	OGST	凹栅 FET	平面结构
制 作	较难	难	较易	易
源寄生电阻	小	最小	较小	较大
栅电容	较大	大	一般	较小
跨 导	大	最大	一般	较小
利用速度过冲	较有利	很有利	一般	较小

RSFET 能较好地利用速度过冲得到好处. 这是由于这种结构源栅间距很小,电子从源注入到沟道后,几乎就进入了栅下有源区,由于电场突变引起的速度过冲能有效地降低电子在栅下的渡越时间,从而提高 f_T^{14} .

三、凹源 MESFET 的工作机理

使用已定型的场效应晶体管通用二维分析程序^[3], 对 RSFET 这一新结构器件进行了二维计算机模拟, 以弄清其工作机理。用于模拟的 GaAs RSFET 器件模型示于图 3。图中 L_0 与 L_s 并不一定要求相等, 可取几种不同的数值通过多次模拟加以比较而决定。具体的结构参数和材料参数为:

$$L_0 = L_s = 0.3\mu\text{m}, L_{gd} = 0.5\mu\text{m}, L_{ds} = 0.8\mu\text{m}, a = 0.16\mu\text{m}, N_d = 2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}.$$

N_d 为材料掺杂浓度, 其余符号所代表的物理意义见图 3。下面简述二维模拟中所采用的数值分析方法。

描述凹源结构场效应晶体管 RSFET 的一组方程是:

$$\nabla^2\phi(x, y) = n(x, y) - N(x, y), \quad (1)$$

$$J_n(x, y) = -r_n^{-1}[n(x, y)\nabla\phi(x, y) - \nabla n(x, y)], \quad (2)$$

$$\nabla \cdot J_n(x, y) = 0. \quad (3)$$

以上给出的是归一化形式。 $N(x, y)$ 是归一化的掺杂浓度(这里假定为均匀掺杂的施主杂质 N_d), 并假定全部离化。 $n(x, y)$ 为归一化的自由电子浓度, $\phi(x, y)$ 为静电电位, $J_n(x, y)$ 为电子电流密度, r_n^{-1} 为归一化电子迁移率。符号“ ∇ ”为二维哈密顿算子。本分析仅考虑稳态问题。速度过冲效应被忽略。

方程(1)是泊松方程, 方程(2)是电流密度方程, 方程(3)是电流连续性方程。

相应的边界条件是:

在源电极:

$$\phi(x, y) = V_s = 0V, n(x, y) = N_d \quad (4)$$

在栅电极:

$$\begin{aligned} \phi(x, y) &= V_{gs} = \phi_d, n(x, y) \\ &= N_d \exp(q(V_{gs} - \phi_d)/KT) \end{aligned} \quad (5)$$

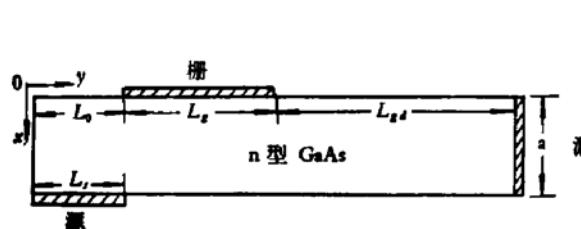


图 3 凹源结构 GaAs RSFET
二维分析模型

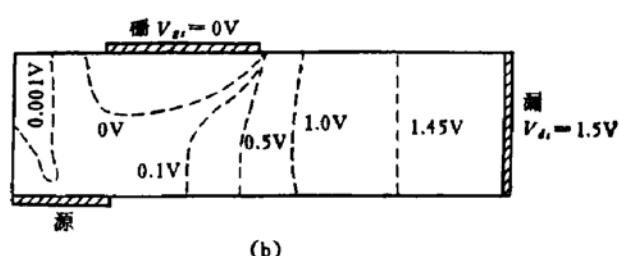
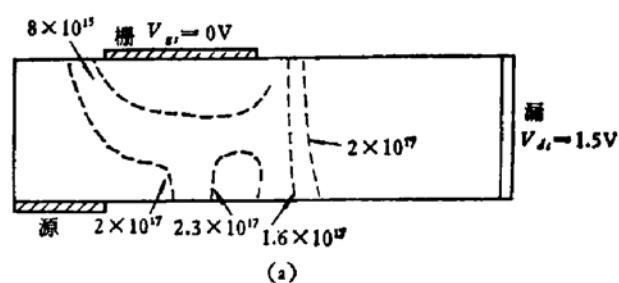


图 4 外加偏置条件下载流子浓度和电位分布
(a) 载流子浓度 (b) 电位

$$\text{在漏电极: } \phi(x, y) = V_{ds}, n(x, y) = N_d \quad (6)$$

除电极以外的平行于 y 轴的边界上:

$$\frac{\partial \phi(x, y)}{\partial x} = 0, \frac{\partial n(x, y)}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

平行于 x 轴的边界上:

$$\frac{\partial \phi(x, y)}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial n(x, y)}{\partial y} = 0 \quad (8)$$

V_s 为源电压, 本分析中始终假定为零; V_{gs} 为外加栅电压, ϕ_d 为金属半导体势垒高度, V_{ds} 为外加漏电压。二维模拟就是通过数值求解带有边界条件(4)–(8)的椭圆型偏微分方程组(1)–(3), 以确定器件内部各点的电位和载流子浓度分布^[2]。下面简述模拟结果。

图 4 示出了外加偏压条件下, 载流子浓度及电位分布。从图中可以看出, 在外加漏偏置 1.5 伏的情况下, 器件栅-漏侧的漏端部分大部分处于电中性, 漏端沟道呈欧姆性。在源电极的上方, 有源区亦呈电中性, 源的左上方处于低场区。这一部分有源区对 RSFET 的工作机理影响不大。但是使 L_0 长度不等于零, 它可以大大提高源栅击穿电压, 放宽工艺精度要求。观察沟道内载流子分布情况, 可以发现, 由于源延伸到了栅下沟道附近, 源电极电位和载流子浓度固定, 耗尽区难以向源处扩展, 因而沟道耗尽区的形状发生变化, 比平面栅 MESFET 的耗尽区呈现更加不对称性。这一变化减小了电子在栅下渡越区的长度, 相当于有效栅长缩短, 对提高频率特性是有益的。从图 4(a) 中还可以发现, 在 RSFET 栅的漏端沟道底部, 也存在着类似于一般 GaAs MESFET 静电偶极畴。在漏压为 1.5 伏、栅压为零伏, 呈现的最高电子浓度为 $2.3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 为一弱偶极畴。它随栅压变负而逐渐减弱。将图 4(b) 中的电位分布转换成电场分布, 可以看出, 流向源电极的电流绝大部分集中在源电极的近栅侧, 这对于充分利用速度过冲也是有利的。

为了弄清 RSFET 的电流夹断行为, 固定漏压在 1.5 伏, 将栅压从零伏一直变到负 3 伏, 此时沟道已接近完全耗尽, 计算的源漏电流也趋近于零。此时的栅压与用解析公式计

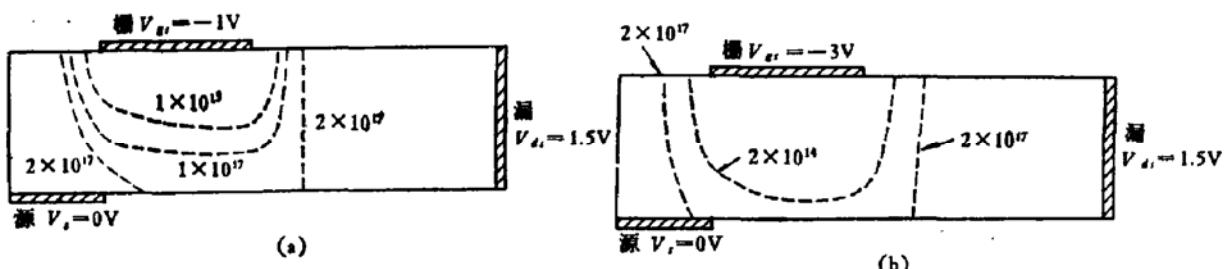


图 5 不同栅偏置条件下载流子浓度分布

(a) $V_{gs} = -1V$ (b) $V_{gs} = -3V$

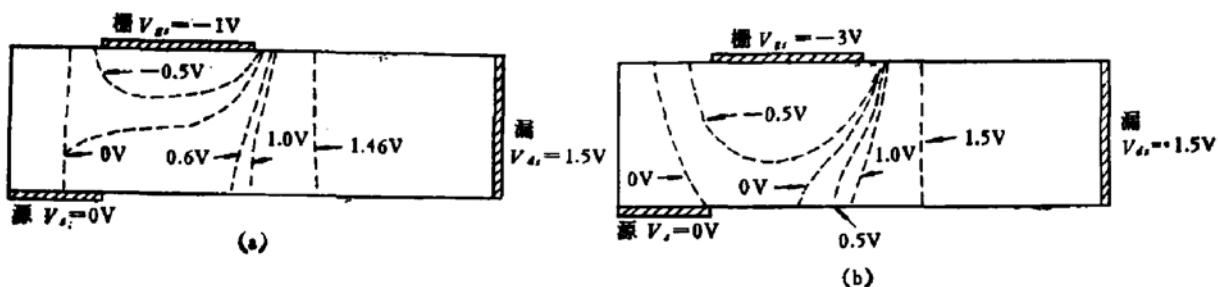


图 6 不同栅偏置条件下的电位分布

(a) $V_{gs} = -1V$ (b) $V_{gs} = -3V$

算的夹断电压十分接近。一般来说，GaAs RSFET 的电流夹断机理与普通的 GaAs MESFET 的夹断机理相同，有一点小小的区别是，随着栅压越来越负，源电极的有效作用面积也越来越小，其作用就象源电极缩短了一样。这一点和源栅对置晶体管十分相似^[4]。载流子浓度和静电电位随栅压变化的情况示于图 5 和图 6。

计算了源漏电流 I_{ds} 、总电荷量 Q ，它们和源漏电压 V_{ds} 及源栅电压 V_{gs} 的关系示于图 7 和图 8。从图 7 中可以看到，在 $V_{gs} = 0$ 伏时，呈现的漏电导 g_d 很小。计算了跨导 g_m 、源栅电容 C_{gs} 、漏电容 C_{gd} 和截止频率 f_T ($f_T = g_m / (2\pi C_{gs})$)。计算结果列于表 2。栅宽均假设为一毫米。

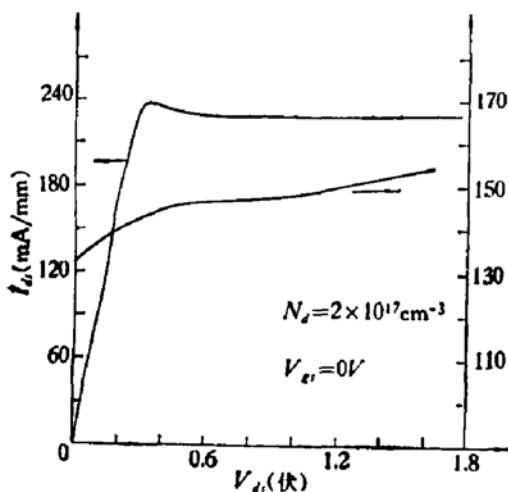


图 7 Q 、 I_{ds} 与 V_{ds} 的关系

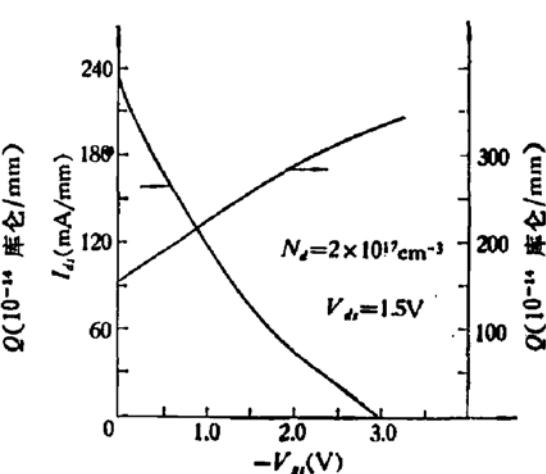


图 8 Q 、 I_{ds} 与 V_{gs} 的关系

表 2 几个重要的器件参数

参数	g_m (ms)	C_{gs} (pF)	C_{gd} (pF)	f_T (GHz)
数值	136	0.76	0.09	28.5
计算点	$V_{gs} = 0V$,	$V_{ds} = 1.5V$		

四、结束语

本文扼要地叙述了凹源场效应晶体管的结构，主要工作机理，并与其它结构的 MESFET 进行了比较。定性的分析表明，RSFET 具有寄生源电阻小，栅电极易于制作，并能较好地利用速度过冲等显著优点。二维分析的结果表明，GaAs RSFET 特性曲线上升十分陡峭，这就证明了这种结构确实具有源寄生电阻小的特点。分析表明，这种结构的 0.5 微米栅 GaAs RSFET 的 f_T 比一般的平面结构 0.5 微米栅 GaAs MESFET 的 f_T 大约高 50% 左右。如果计及由速度过冲效应给频率特性带来的好处，则实际器件的跨导和截止频率将优于稳态二维分析的结果^[4]。由于降低了寄生电阻，预计也将会有较好的噪声性能。

本工作得到了高级工程师林金庭、刘良俊，以及吴允弘等同志的指导和帮助，在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] B. Carnez, A. Cappy, R. Fauquembergue, E. Constant and G. Salmer, *IEEE Trans.* ED-28, 784 (1981).
- [2] 潘晓明, 固体电子学研究与进展, 2, 1 (1982).
- [3] 场效应晶体管通用二维分析程序研究报告, 南京固体器件研究所 (1983).
- [4] J. P. Krusius and J. J. Berenz, *IEEE Trans.*, ED-30, 1116 (1983).

A Novel FET with a Recessed Source Structure

Pan Xiaoming

(Nanjing Solid State Devices Research Institute)

Abstract

A novel Recessed Source structure Field Effect Transistor (RSFET) is presented. The operation principles of the RSFET have been analyzed using a numerical two-dimensional device simulation program. A comparison between the RSFET and other existing structures is also given.