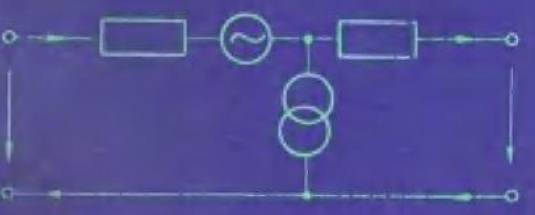
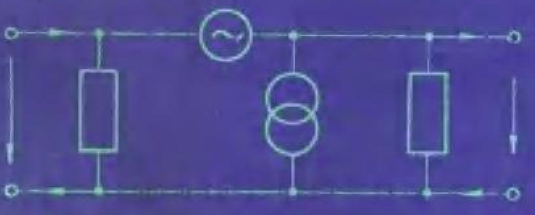
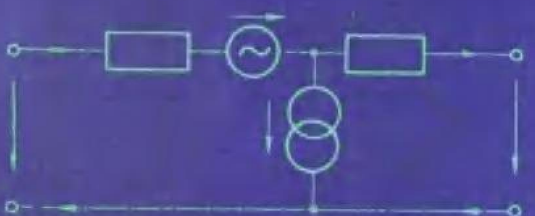
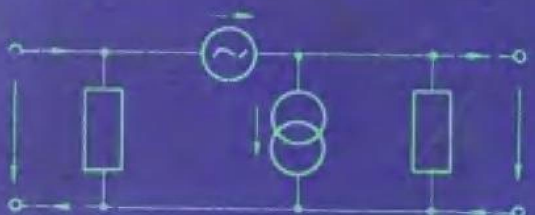
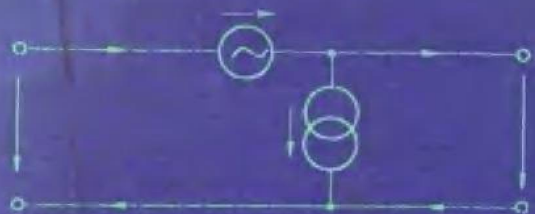


# 场效应晶体管理论基础

亢宝位 编著



科学出版社

## 内 容 简 介

本书系统地阐述了各种类型场效应晶体管的工作原理、静态特性、高频性能、功率性能及噪声性能等。全书共十二章，第一至六章为结型场效应晶体管 and 金属-半导体场效应晶体管；第七至十一章为金属-氧化物-半导体场效应晶体管；第十二章简单介绍了其他各种场效应晶体管，如静电感应晶体管、可透基区晶体管、各种敏感晶体管等的原理及特点。

本书可作为工科大学半导体物理与器件专业的研究生和高年级大学生的教学参考书，也可供从事晶体管和集成电路研究的科技工作者阅读参考。

## 场效应晶体管理论基础

亢宝位 编著

责任编辑 魏玲

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1985年7月第一版 开本：787×1092 1/16

1985年7月第一次印刷 印张：23 1/4

印数：0001—5,600 字数：528,000

统一书号：15031·663

本社书号：3882·15—7

定价：5.40元



## 前 言

场效应晶体管包括几种不同的种类,其中主要的种类在五十和六十年代已被提出,金属-氧化物-半导体场效应晶体管(MOSFET)在六十年代也已广泛地应用于集成电路中。然而,在七十年代之以前,晶体管研究的主要精力仍集中于双极型晶体管方面。只是在双极型晶体管得到比较充分的发展,其性能的进一步提高已感到十分困难的时候,人们才开始把进一步提高晶体管性能的希望寄托于场效应晶体管。近十几年来,国外集中了很大力量研究场效应晶体管,在基本理论和制造技术方面都取得了迅速的进展。在工作频率、输出功率、噪声性能、开关速度等许多方面都达到了前所未有的水平。短沟道 MOSFET 在大规模集成电路中占据重要位置。可以认为,在半导体器件中,场效应晶体管已经占有重要地位,并且具有进一步的发展前途,其发展之势正方兴未艾。在我国,目前还缺乏比较全面、系统地阐述场效应晶体管基本原理的书籍。现行大专院校的教材中与之有关的内容还不多。由于教学工作的需要,1976年底,笔者开始酝酿写作此书,目的是想编写出一本能够反映七十年代以来新发展的偏重于系统阐述场效应晶体管基本理论的书。经过两年的准备,于1979年开始动笔,书中一部分最基本的内容取自国外几部较好的早期著作,而较为深入和专门一些的内容,以及反映七十年代以来新发展的内容,则是直接根据国外发表的文献进行整理、综合而成。1980年春写成了一本简单的讲义,在北京工业大学向1978年入学的半导体物理与器件专业的研究生进行了讲授。其后又在此基础上重新改写,于1982年底写成本书。

本书共三篇。第一篇介绍结型场效应晶体管和金属-半导体场效应晶体管。鉴于这两类器件的工作原理相似,所以将其合并在一起进行叙述。第二篇介绍金属-氧化物-半导体场效应晶体管。以上两篇是本书的主体。每篇中都分别叙述了其直流特性、高频特性、噪声特性、功率特性和开关特性等。第三篇叙述除以上三种类型以外的其他各种场效应晶体管。因其中多数是具有特殊结构或特殊用途的场效应晶体管,所以第三篇定名为特殊场效应晶体管。这一篇只是各种器件的简单介绍,每种器件的叙述都很简单。

鉴于国内这方面的书较缺乏,本书内容选取比较广泛。既包含了基本原理的系统分析,又包括了最新发展;既包括了一般分析,又包括了较为专门和较为深入的理论分析。在晶体管的种类上,也尽可能包括了目前已发展的各种场效应晶体管。这样作的目的,是为了满足不同读者的需要。本书的主要读者对象是工科大学半导体物理与器件专业的研究生和高年级大学生。同时也可供从事有关晶体管和集成电路研究的科技人员参考。

在本书写作过程中,清华大学李志坚教授、北京大学黄永宝教授在百忙中先后挤时间审阅了作为讲义用的初稿,提出了宝贵的修改意见。在新稿完成以后,清华大学曹培栋、张建人两位副教授分别仔细审阅了第一篇及第二、三篇。并对书中有关内容提出了很多宝贵意见。最后,李志坚教授又在极端繁忙中不惜花费宝贵时间重新审阅了全稿,对书中的内容组织、材料取舍和不少具体内容提出了许多指导性意见。根据这些意见,作者又作

了再次修改才成为现在的最后稿。以上各位学者在本书写作过程中所给予的原则指导和具体帮助，对于提高本书的质量起了重要作用。他们对待学术问题一丝不苟的严谨态度也令人难以忘怀。值此机会，作者谨向他们表示由衷的敬意和诚心的感谢。

由于作者水平所限，加之写作时间也较仓促，书中错误和不妥之处一定不少，恳请读者指教。

亢宝位 谨识

一九八三年于北京工业大学

## 主要符号表

$a$	对称栅结构 JFET、MESFET 冶金沟道深度(高度)之半	$C_{dg}$	小信号栅漏电容(包括内部 FET 电容和寄生电容)
$A$	噪声系数表达式中缩写符号( $=R_n g_{11s}$ )	$C_{ds}$	漏源总电容
$A_1, A_2, A_3, A_v$	级数解中的系数	$C_{gs}$	小信号栅源电容
$a_1, a_2, a_3$	MESFET 中源接触区、栅源间隔区、栅区的有源层厚度	$C_{gs}$	$=qQ_{gs}$
$a_{eff}$	离子注入沟道的等效深度	$C_{ot}$	MOST 总栅沟电容( $=C_{ox} LZ$ )
$a_s$	有源层表面自然感生的耗尽层深度	$C_{ox}$	单位面积氧化层电容
$b$	对称栅结构 JFET、MESFET 的中性沟道深度(高度)之半	$C_{pd}$	压焊柄 MOS 电容
$b_D$	沟道近漏端的 $b$ 值	$C_{dgs}$	寄生栅漏电容
$b_S$	沟道近源端的 $b$ 值	$C_{dgt}$	内部 FET 栅漏电容(饱和区工作时 $C_{dgt}=0$ )
$b_s$	信号源导纳虚部	$C_{gse}$	FET 寄生栅源电容
$b_{DS}$	饱和区工作时的 $b_D$ 值	$C_{gst}$	内部 FET 栅源电容
$b_{11s}$	$y_{11s}$ 的虚部	$d, d_p$	栅结耗尽层向沟道中延伸的宽度
$b_{sopt}$	最小噪声系数对应的最佳信号源电纳	$D$	扩散系数、强场扩散系数
$C$	泛指电容或 MOS 电容	$d_s$	离子注入的等效深度(近似为阶梯分布时)
$C$	GaAs MESFET 中相关系数的参量( $C=C_1+C_2$ )	$d_n$	SIT 中栅结耗尽层宽度
$C$	MOST 中单位栅长对应的栅氧化层电容( $=C_{ox} Z$ )	$D_n$	电子扩散系数
$jC$	GaAs MESFET 中 $i_{nd}$ 与 $i_{ng}$ 的相关系数(意义同 $C_r$ )	$d_{pp}$	沟道中最强电场达到 $E_p$ 时, 栅结耗尽层向沟道中延伸的最大宽度
$C_0$	$V_G=0$ 时栅沟结耗尽层总电容(JFET、MESFET)	$d_{dom}$	高场畴的宽度
$C_1$	单位长度沟道的栅沟耗尽层电容	$d_{dom}^p$	高场畴雪崩击穿时的宽度
$C_1$	中性导电沟道区对相关系数 $C$ 的贡献	DOSE	离子注入剂量
$C_2$	沟道中速度饱和区对相关系数 $C$ 的贡献	$E$	电场强度
$C_D$	半导体表面耗尽层电容(第九章), 意义同 $C_s$	$E_0$	$v-E$ 关系中参量
$C_r$	噪声电流的相关系数	$E_B$	高场畴雪崩击穿时畴内最大电场
$C_s$	MOS 系统中半导体表面空间电荷区电容	$E_C$	$v-E$ 关系中参量( $=v_{si}/\mu_{no}$ ), 称速度饱和和临界电场
$C_{12}, C_{13}, C_{23}$	FET 极间寄生电容	$E_k$	$v-E$ 关系中参量
$C_{ac}$	JFET、MESFET 漏沟反馈电容(电偶极层电容)	$\bar{E}_m$	电场强度最大值(高场畴中)
		$E_p$	GaAs 的 $v-E$ 关系中峰值漂移速度对应的电场强度
		$E_R$	高场畴边界处的电场
		$E_s$	高场畴维持电场(对 GaAs, $E_s \doteq E_0$ )
		$E_s$	MOS 系统中半导体最表面处的电场( $=E_s _{x=0}$ )

$E_x$	FET 中沿 $x$ 方向的电场强度		
$\bar{E}_x$	$E_x$ 在反型层中的平均值		对称栅结构 $G_0 = 2q\mu_n a N_D Z/L$ , 对于
$E_y$	FET 中沿 $y$ 方向的电场强度		高阻衬底结构 $G_0 = q\mu_n a N_D Z/L$
$E_{cs}$	$E_c$ 与 $E_p$ 的统称(与 $v_{sat}$ 相对应的电场强度)	$G_p$	功率增益
$E_{ox}$	表面反型层中电子的 $v-E_x$ 关系中的参量	$g_s$	信号源导纳实部
$E_{oy}$	表面反型层中电子的 $v-E_y$ 关系中的参量	$G_S$	$= G_0 \{1 - [(W_G - V_S)/W_p]^{1/2}\}$ (JFET、MESFET)
$E_{c1}, E_{c2}$	半导体中 $v-E$ 关系中参量	$G_S$	$= C_{ox} \bar{\mu}_n Z (V_G - V_T)/L$ (MOST)
$E_{ox}$	紧靠 Si-SiO <sub>2</sub> 界面处二氧化硅中电场强度	$g_{dn}$	$\bar{i}_{nd}^2 = 4kT 4f g_{dn}$
$E_{out}$	GaAs MESFET 栅与漏的间隔区中电场强度	$g_{ds}$	饱和区的 $g_d$ 值
$E_{sat}$	$v-E$ 关系中电子速度开始饱和时的电场强度(为 $v_{si}$ 和 $v_p$ 的统称)	$g_{gn}$	$\bar{i}_{ng}^2 = 4kT 4f g_{gn}$
$F$	噪声系数	$G_{MA}$	最大可利用功率增益(同 MAG)
$f$	频率	$G_{MS}$	最大稳定功率增益(同 MSG)
$f$	漏栅电压反馈系数(MOST)	$g_{ms}$	饱和区跨导
$f_c$	噪声系数截止频率	$g_{ms}$	外部 FET 的 $g_{ms}$ (只与内部 FET 对比时才用)
$f_k$	由无条件稳定变为条件稳定的临界频率	$g_{ms1}, g_{ms2}$	分别为 JFET 上栅和下栅的饱和区跨导
$F_{min}^o$	当偏压变化时 $F_{min}$ 的极小值	$g_{msz}$	零温度系数工作点下的 $g_{ms}$
$f_c$	稳定系数 $K$ 达到峰值时的频率	$g_{sopt}$	最小噪声系数对应的最佳信号源电导
$f_T$	增益-带宽积(电流增益等于 1 时的频率)	$h$	半绝缘衬底厚度(第一篇)
$f_u$	单向化功率增益等于 1 时的频率	$h_{11}, h_{12}, h_{21}, h_{22}$	四端网络的 $h$ 参量
$f_{max}$	MAG 等于 1 时频率, 称最高振荡频率	$h_{11s}, h_{12s}, h_{21s}, h_{22s}$	内部 FET 共源 $h$ 参量
$F_{min}$	最小噪声系数(对应最佳信号源阻抗)	$i$	小信号电流
$G(V)$	MOST 沟道电导, $G(V) = C_{ox} \bar{\mu}_n Z \times (V_G - V_T - V)/L$	$i$	$\equiv (a/3L)(I_D/I_p)$ (仅讨论 GCA 的适用范围时用)
$g_{11s}$	$y_{11s}$ 的实部	$I$	直流电流
$g_d$	漏源小信号电导	$\tilde{I}$	直流与小信号电流叠加后的瞬时值
$G_D$	$\equiv G_0 \{1 - [(W_G - V_D)/W_p]^{1/2}\}$ (JFET、MESFET)	$I_0$	电子速度饱和时的饱和漏极电流(对称栅结构 $I_0 = 2q a N_D Z v_{si}$ , 高阻衬底结构 $I_0 = q a N_D Z v_{si}$ )
$\mathcal{G}_D$	函数 $G(V)$ 在沟道漏端的值, $G_D = G_V (V = V_D)$ (MOST)	$I_A$	$= I_p/3$
$G_s$	电流增益(输出短路)	$i_d$	小信号漏极电流
$g_m$	FET 的跨导	$I_D$	直流漏极电流
$g_n, G_n$	等效噪声电导(附录 B, 第五章)	$I_D^*$	归一化漏极电流( $\equiv I_D L/Z$ )
$G_0$	$V_D = 0$ 时 MOST 的沟道电导, $G_0 = C_{ox} \bar{\mu}_n Z (V_G - V_T)/L$	$I_F$	$W_G^i = 0$ 时膝点电流 (JFET、MESFET 的最大漏极电流)
$G_0$	JFET、MESFET 冶金沟道电导, 对于	$I_G$	栅极直流电流
		$i_g$	栅极小信号电流
		$i_n$	短路噪声电流
		$I_p$	$W_G = 0$ 时饱和漏极电流( $\equiv -G_0 W_p/3$ )
		$I_p$	外部 FET 的 $I_p$ (只在与内部 FET 对比时用)
		$I_{DS}$	饱和漏极电流

$I_{DS}$	外部 FET 的饱和漏极电流(仅在与内部 FET 对比时用)	$n$	电子密度; 半导体型号
$i_{nd}$	漏源短路噪声电流( $v_g=0$ )	$N_A$	受主杂质密度
$i_{ng}$	栅源短路噪声电流( $v_d=0$ )	$N_b$	离子注入杂质近似为阶梯函数分布时的体内密度
$i_{ns}$	信号源内阻的热噪声电流	$N_D$	施主杂质密度
$I_{SIF}$	最大源极电流	$\bar{N}_D$	沟道中平均施主杂质密度
$I_{DSS}$	$V_g=0$ 时的饱和漏极电流	$n_i$	本征载流子密度
$I_{DSSZ}$	零温度系数工作点下的 $I_{DS}$	$N_0$	沟道中最高杂质密度
$i_{nd1}$	中性沟道区对 $i_{nd}$ 的贡献	$N_m$	离子注入峰值杂质密度
$i_{nd2}$	速度饱和区对 $i_{nd}$ 的贡献	$N_S$	离子注入杂质阶梯函数分布的表面区密度
$i_{ng1}$	中性沟道区对 $i_{ng}$ 的贡献	$N_{A1}$	n 沟 JFET 中上栅区杂质密度
$i_{ng2}$	速度饱和区对 $i_{ng}$ 的贡献	$N_{A2}$	n 沟 JFET 中下栅区杂质密度
$I_{sub}$	衬底电流	$n_{cr}$	高场畴中电子的特征密度
$I_{Dmax}$	最大漏极电流(MOST)	$p$	空穴密度; 半导体型号
$j$	电流密度	$p$	$\equiv V_D/(V_G - V_T)$ (MOST 中)
$j_n$	噪声电流密度	$P$	$\equiv P_1 + P_2$ 噪声公式中参数
$k$	MOST 伏安特性中系数	$P_0$	增强约翰逊噪声中随偏压变化的因子
$k$	玻耳兹曼常数	$P_1$	反映中性沟道区增强约翰逊噪声对 $i_{nd}$ 的贡献的因子
$K$	稳定因子	$P_2$	反映速度饱和和沟道区强场扩散噪声对 $i_{nd}$ 的贡献的因子
$K$	绝对温度	$P_D$	漏极损耗功率(即沟道损耗功率)
$K_1$	$F_0$ 中经验系数	$p_i$	本征空穴密度
$K_1$	$g_{ms}$ 中经验系数	$P_m$	最大输出功率
$K_2$	$C_{gs}$ 中经验系数	$p_m$	$\equiv V_{Dsat}/(-W_p)$ ('i' 表示内部 FET)
$K_c, K_r, K_g$	反映噪声性能随工作点变化的参数	$P_0$	增强约翰逊噪声中 $P_0$ 的增强部分
$k_s$	热导率(半导体、焊料)	$P_{om}$	最大耗散功率
$k_{Au}$	金的热导率	$P_{omax}$	MOST 最大输出功率
$k_{Cu}$	铜的热导率	$q$	电子电荷(取正值)
$L$	栅长; 沟道长度	$Q_B$	强反型时表面耗尽层固定电荷量(对应着表面耗尽层最大宽度)
$L_1, L_2$	分别为中性沟道区、速度饱和沟道区的长度	$Q_d$	表面耗尽层固定电荷(有时亦指表面耗尽层中已耗尽掉的自由载流子电荷量)
$L_d, L_g, L_s$	漏极、栅极、源极引线电感	$Q_f$	固定氧化物电荷量
$L_D$	德拜长度	$Q_g$	栅电极上电荷量
$L_g$	栅金属条的宽度(沿沟道电流方向)	$Q_G$	MOS 电容中栅金属极板上的电荷量
$L_i$	本征半导体德拜长度	$Q_m$	可动氧化物电荷量
$L_s$	源金属条宽	$Q_n$	表面反型层中自由载流子电荷量
$L_{ds}$	漏源间距	$Q_s$	表面空间电荷区总电荷量(包括反型层中)
$L_{eff}$	有效沟道长度( $\equiv L - \Delta L$ )	$Q_T$	冶金沟道中包含的自由载流子总电荷量
$\Delta L$	沟道夹断区长度		
$m$	电子有效质量		
$m$	沟道杂质分布函数中的指数(第一篇)		
$m$	谐振模数(第三篇)		
MAG	$\equiv G_{MA}$		
MSG	$\equiv MS$		

$Q_{ch}$	整个中性沟道区自由载流子总电荷量	$t_0$	$\equiv -3L^2/2\mu_{n0}W_p$ , 电子通过沟道的渡越时间
$Q_{ii}$	Si-SiO <sub>2</sub> 界面陷阱电荷量	$T_a$	环境温度
$Q_{ot}$	氧化物中陷阱电荷量	$t_d$	平均延迟时间(JFET、MESFET)
$Q_{SS}$	等效界面电荷量	$t_d$	延迟时间(MOST)
(除 $Q_{ch}$ 外, 以上电荷量均指单位栅电极面积下的电荷量)		$T_e$	等效电子温度, 噪声温度
$r$	单位长度沟道的沟道电阻(MOST)	$t_r$	漏极电流上升时间
$R$	电阻	$t_r^2$	栅极驱动电压信号上升时间
$r_1$	单位长度中性沟道电阻(JFET、MESFET)	$T_{ch}$	沟道温度(MOST)
$R_1$	增强约翰逊噪声对 $i_{na}$ 贡献中的偏压函数	$t_{ox}$	栅区氧化层厚度
$R_2$	强场扩散噪声对 $i_{na}$ 贡献中的偏压函数	$T_{chmax}$	最大允许沟道温度
$r_c$	相关阻抗 $Z_c$ 的实部	$u$	归一化电位函数 $\equiv [(W_G - V)/W_p]^{1/2}$ (JFET、MESFET)
$r_d$	小信号漏源电阻( $=1/g_d$ )	$u$	归一化电位函数 $\equiv q\phi/kT$ (MOSFET)
$R_D, R_d$	漏极串联电阻	$U$	最大单向化功率增益
$R_G, R_g$	栅极串联电阻	$U_D$	$\equiv (W_G - V_D)/W_p$ (JFET、MESFET)
$R_i$	等效电路中输入电路的电阻	$u_D$	$\equiv [(W_G - V_D)/W_p]^{1/2}$
$R_m$	栅金属条的欧姆电阻	$U_D$	$\equiv (V_G - V_D - V_T)/V_T$ (MOST)
$R_n, r_n$	等效噪声电阻	$u_F$	$\equiv q\phi_F/kT$
$R_0$	中性沟道区增强约翰逊噪声对栅噪声 $i_{ng1}$ 贡献中的偏压函数	$u_i$	声速
$R_0$	$\equiv 1/G_0$	$u_n$	$\equiv q\phi_n/kT$
$R_p$	离子注入射程	$u_s$	$\equiv q\phi_s/kT$
$R_S, R_s$	源极串联电阻	$u_S$	$\equiv [W_G/W_p]^{1/2}$
$r_s$	信号源阻抗实部	$U_S$	$\equiv (W_G - V_S)/W_p$
$R_3$	中性沟道区增强约翰逊噪声对栅噪声 $i_{ng1}$ 贡献中增强部分的偏压函数	$u_{DS}$	$V_D = V_{Dsat}$ 时的 $u_D$
$R_{de}$	耗尽型 MOST 等效漏源直流电阻	$U_{Dsat}$	$V_D = V_{Dsat}$ 时的 $U_D$
$R_{en}$	增强型 MOST 等效漏源直流电阻	$V$	直流电压; 泛指电压
$R_{on}$	FET 导通电阻(直流)	$V(y)$	沟道中任意位置与源间的电位差
$R_{th}$	热阻	$v$	载流子定向漂移速度
$R_{dom}$	高场畴等效电阻	$v$	小信号电压
$R_{min}$	MOST 中高阻区的最小电阻(保证击穿电压前提下)	$\bar{V}$	直流电压与交流小信号电压叠加后的瞬时值
$R_{sub}$	MOST 的衬底欧姆电阻	$V'(y)$	沟道中任意位置与栅间的电位差
$r_{sopt}$	最小噪声系数对应的最佳信号源电阻	$V''(y, t)$	$\equiv (V_{Gm} - V_T - \bar{V})$
$s$	$\equiv (W_{sg}/W_p)^{1/2}$ $\equiv (W_G/W_p)^{1/2}$	$\bar{V}$	$\equiv 1 - [\bar{V}/(V_{Gm} - V_T)]$
$T$	晶格温度(此时与 $T_0$ 同义); 温度	$V_B$	雪崩击穿电压
$t$	时间	$v_0$	等效电路中 $C_{gs}$ 两端的小信号电压 ( $v_0 \neq v_g$ )
$t$	栅漏间隔区未耗尽的有源层厚度	$v_d$	小信号漏源电压
$t'$	$\equiv \mu_n(V_{Gm} - V_T)t/L^2$	$v_d$	漂移速度
		$V_D$	直流漏源电压
		$V'_D$	外部 FET 直流漏源电压(只在与内部



	FET 比较时用)	$V_{Dmin}$	最大漏极电流 $I_{Dmax}$ 下所能得到的最小漏源电压
$v_D$	高场畴中电子总速度	$V_{Dsat}$	漏极电流开始饱和时的漏源电压, 简称饱和电压或临界饱和电压, 同时也是饱和区中性沟道两端的电压
$v_f$	源极串联电阻的热噪声电压 ( $=\sqrt{4kT\Delta fR_S}$ )	$V_{4300}$	300 K 时的 $V_t$ 或 $V_{t0}$
$V_G$	栅源电压	$BV_{ceo}$	寄生双极晶体管的集电极-发射极击穿电压
$V'_G$	$\equiv V_G - V_{FB}$	$BV_{Dsub}$	漏衬 pn 结雪崩击穿电压 (MOST)
$V''_G$	外部 FET 的栅源电压 (只在与内部 FET 比较时用)	$W$	$W = V + V_t$ , 包含自建电位差在内的 pn 结或肖特基结两边的电位差 (应与外加电压 $V$ 相区别)
$v_g$	小信号栅源电压	$W_d$	沟道中任意位置处栅结两侧的电位差 ( $=W_G - V_{(x)}$ )
$V_h$	沟道势垒高度	$W_G$	栅与源间电位差 ( $=V_G + V_t$ )
$V_t, V_{t0}$	pn 结或肖特基结的自建电势差	$W'_G$	外部 FET 的栅源电位差 (只在与内部 FET 对比时使用)
$V_K$	膝点电压	$W_p$	$V_D = 0$ 时沟道夹断时栅源电位差 ( $=V_p + V_t$ ), 也简称沟道夹断电压
$v_m$	栅极串联电阻的热噪声电压 ( $=\sqrt{4kT\Delta fR_G}$ )	$W_{d0}$	沟道漏端 ( $x=L$ 处) 的 $W_{d0}$ 值
$v_n$	开路噪声电压	$W_{G1}$	上栅与源间电位差
$v_p$	$v-E$ 关系中峰值漂移速度	$W_{G2}$	下栅与源间电位差
$V_p$	$V_D = 0$ 时沟道夹断所需的外加栅源电压 (简称沟道夹断电压)	$W_{p1}$	上栅夹断电压
$v_R$	高场畴边界处的载流子速度	$W_{p2}$	下栅夹断电压
$V_S$	源极直流电位 (本书中 $V_S = 0$ )	$W_{sg}$	沟道源端 ( $x=0$ 处) 的 $W_{sg}$ 值
$v_S$	小信号源极电位 (本书中 $v_s = 0$ )	$W_{sg}$	沟道中任意位置处栅势垒两侧的电位差 (包含 $V_t$ )
$V_T$	MOST 开启电压	$x$	坐标, 在 JFET、MESFET 中沿沟道方向从源指向漏; 在 MOST 中垂直于表面方向
$V_T^0$	假设 $V_{FB} = 0$ 时的开启电压	$x_0$	相关阻抗 $Z_0$ 的虚部
$V_T^*$	令 $\phi_s = 2\phi_B/3$ 时的 $V_T$ 值	$x_d$	表面耗尽层宽度
$BV_{DS}$	FET 漏源击穿电压	$x_i$	表面反型层的边界 (表面区少子密度等于本征载流子密度)
$V_{DS}^L$	FET 漏源间最大允许外加电压	$x_j$	pn 结结深, MOST 中漏和源扩散结深
$V_{FB}$	平带电压	$x_s$	信号源阻抗虚部
$V_{Gm}$	开关工作时栅驱动阶梯电压的高电平值	$x_y$	MOST 沟道夹断区中沟道电流离开 Si-SiO <sub>2</sub> 界面的距离
$V_{G0}$	零温度系数工作点时的栅源电压	$x_{ip}$	表面本征点位置 (表面多子密度等于本征载流子密度)
$V_{KF}$	$W_t^L = 0$ 时的膝点电压	$x_{dmax}$	表面耗尽层最大宽度
$V_{L1}$	FET 中中性沟道区两端的电压	$x_{inv}$	表面强反型层的边界 (表面少子密度等于体内多子密度)
$V_{L2}$	FET 中速度饱和区 (沟道夹断区) 两端的电压		
$V_{ox}$	MOS 系统中氧化层两边的电位差		
$V_{ox}^T$	强反型开始时的 $V_{ox}$		
$V_{pT}$	穿通电压		
$V_{BS}$	衬底相对于源的电压		
$v_{si}$	电子饱和和漂移速度		
$\bar{v}_{si}$	反型层中电子饱和和漂移速度		
$V_{dom}$	高场畴上的电压		
$BV_{dom}$	高场畴雪崩击穿电压		
$V_{Dmax}$	最大外加的漏源电压		

$\alpha_{opt}$	最小噪声系数对应的最佳信号源阻抗的虚部	$\mu_{lo}$	晶格散射决定的低电场迁移率
$y$	坐标, JFET、MESFET 中垂直于沟道电流方向; MOST 中沿着沟道方向从源指向漏	$\mu_{no}$	低电场电子迁移率
$y_i, y_r, y_m, y_o$	四端网络的 $\pi$ 型等效电路中导纳元件	$\xi$	$\equiv q(\phi_n - \phi_p)/kT$
$Y_S$	信号源导纳	$\xi$	$\equiv (1-y')/2\sqrt{V'}$ (偶然用)
$y_{11}, y_{12}, y_{21}, y_{22}$	四端网络参数	$\rho$	电阻率; 空间电荷密度
$y_{11s}, y_{12s}, y_{21s}, y_{22s}$	共源接法内部 FET 的四端网络参数	$\sigma$	电导率
$z$	子 FET 的栅宽	$\tau_m$	电子动量弛豫时间
$Z$	FET 的总栅宽 ( $Z = ns$ )	$\tau_e$	电子能量弛豫时间
$\gamma$	反映衬底杂质密度影响的系数 (见 MOST 二级近似理论)	$\phi$	电位
$\Gamma$	速度饱和因子 ( $= -\mu_{no} W_p / L v_{si}$ )	$\phi_c$	表面电子准费米势与体内费米势之差
$\delta$	电子温度 $T_e$ 与电场关系中的一个参数	$\phi_F$	MOST 体内费米能级 (相对禁带中线)
$\epsilon_s$	半导体相对电容率	$\Phi_M$	$q\Phi_M$ 为金属的功函数
$\epsilon_0$	真空电容率	$\phi_s$	半导体表面势
$\epsilon_{ox}$	氧化物的相对电容率	$\Phi_S$	$q\Phi_S$ 为半导体的功函数
$\eta$	$= b/a$	$\phi_{F4}$	离子注入 MOST 中体内费米能级
$\eta_{add}$	功率转换效率	$\phi_{FS}$	离子注入 MOST 中表面区费米能级
$\theta$	沟道杂质分布函数中的参数 (第一篇)	$\Phi_{MS}$	$= \Phi_M - \Phi_S$
$\lambda$	$= \Gamma(L/a)$	$\psi_n$	pn 结 n 型区的电位
$\mu$	迁移率	$\psi_p$	pn 结 p 型区的电位
$\bar{\mu}$	反型层中载流子有效迁移率	$\omega$	圆频率
$\mu_0$	$\mu-E$ 关系中一个经验常数	$\omega_0, \omega_1, \omega_2$	JFET、MESFET 中频率参量
$\mu_1$	卫星谷中低电场迁移率	$\omega_T$	增益带宽积 ( $= 2\pi f_T$ )
$\mu_n, \bar{\mu}_n$	电子迁移率, 反型层中电子有效迁移率	$\omega_T^i$	内部 FET 的 $\omega_T$
		$\omega_u$	单向化功率增益 $U=1$ 时的频率 ( $= 2\pi f_u$ )
		$\omega_{fm}$	无反馈损失时晶体管最高振荡频率
		$\omega_{max}$	最高振荡频率
		$\omega_{max}^i$	内部 FET 最高振荡频率
		$\omega_x$	FET 的一个频率参量

# 目 录

前言 .....	VII
主要符号表 .....	IX
绪论 .....	1
0.1 场效应晶体管的发展 .....	1
0.2 场效应晶体管的分类 .....	3
0.3 场效应晶体管的前景 .....	5
 <b>第一篇 结型场效应晶体管和金属-半导体场效应晶体管(JFET 与 MESFET)</b>	
第一章 直流电场下半导体中的电子输运 .....	7
1.1 硅与砷化镓中电子的速度-电场关系 .....	7
1.1.1 硅中电子的速度-电场关系 .....	7
1.1.2 砷化镓中电子的速度-电场关系 .....	10
1.1.3 电子速度过冲 .....	11
1.2 硅器件中的载流子速度饱和及电偶极层的形成 .....	13
1.3 砷化镓器件中负微分迁移率与高场畴的形成 .....	14
1.3.1 高场畴的形成 .....	14
1.3.2 等面积定则 .....	15
1.3.3 维持电场 .....	17
参考文献 .....	18
第二章 JFET 与 MESFET 的工作原理 .....	20
2.1 结构与制造方法 .....	20
2.1.1 双扩散 JFET .....	20
2.1.2 外延扩散 JFET .....	21
2.1.3 集成 JFET .....	21
2.1.4 垂直沟道隐埋栅 JFET .....	21
2.1.5 薄层外延 GaAs MESFET .....	23
2.1.6 离子注入 GaAs MESFET .....	24
2.2 工作过程的物理分析 .....	24
2.2.1 肖克莱模型 .....	24
2.2.2 沟道中载流子速度饱和 .....	26
2.2.3 沟道中形成高场畴 .....	29
2.2.4 饱和区工作机理讨论 .....	35
参考文献 .....	38
第三章 JFET 与 MESFET 的直流特性与低频小信号参数 .....	40
3.1 肖克莱理论(常数迁移率) .....	40
3.1.1 肖克莱理论 .....	40
3.1.2 非均匀沟道杂质密度分布 .....	45

3.1.3	四极管特性 .....	52
3.2	速度饱和情形(迁移率随电场变化) .....	54
3.2.1	$\mu$ - $E$ 关系双曲函数近似 .....	55
3.2.2	$v$ - $E$ 关系分段线性近似 .....	60
3.3	高场畴情形 .....	62
3.4	各种理论适用范围讨论 .....	64
3.4.1	缓变沟道近似(GCA)的适用范围 .....	64
3.4.2	沟道夹断与速度饱和 .....	67
3.5	小信号漏源电导 $g_d$ .....	68
3.6	漏、源串联电阻的影响 .....	74
3.7	温度对直流特性的影响 .....	76
3.7.1	漏极电流的温度特性 .....	76
3.7.2	栅极电流的温度特性 .....	81
3.7.3	夹断电压的温度特性 .....	82
	参考文献 .....	82
<b>第四章</b>	<b>JFET 与 MESFET 的高频性能 .....</b>	<b>84</b>
4.1	内部 FET 的高频小信号参量和等效电路 A. 集总参量物理等效电路法 .....	84
4.1.1	高频小信号等效电路 .....	85
4.1.2	高频小信号 $y$ 参量 .....	86
4.1.3	等效电路元件数值的计算公式(饱和区) .....	87
4.2	内部 FET 的高频小信号参量和等效电路 B. 分布参量传输线模拟法 .....	90
4.2.1	常数迁移率情形 .....	90
4.2.2	速度饱和情形 .....	98
4.3	内部 FET 的高频小信号参量和等效电路 C. 解沟道连续方程法 .....	100
4.3.1	沟道连续方程及其解 .....	100
4.3.2	小信号 $y$ 参量 .....	102
4.3.3	小信号等效电路 .....	104
4.4	外部 FET 的小信号等效电路和小信号参量 .....	106
4.4.1	外部 FET 的等效电路 .....	106
4.4.2	外部 FET 的小信号参量 .....	110
4.5	JFET、MESFET 的高频增益 .....	115
4.5.1	有源四端网络的增益公式 .....	115
4.5.2	JFET、MESFET 的高频增益 .....	116
4.6	增益-带宽积与最高工作频率限制 .....	119
4.6.1	增益-带宽积 .....	120
4.6.2	最高工作频率限制 .....	121
	参考文献 .....	125
<b>第五章</b>	<b>JFET 与 MESFET 的噪声性能 .....</b>	<b>127</b>
5.1	JFET、MESFET 中噪声源 .....	128
5.1.1	热噪声 .....	128
5.1.2	散粒噪声 .....	131
5.1.3	产生-复合噪声 .....	131

5.2	FET 噪声性能的特征	131
5.3	硅 JFET 低频噪声性能	134
5.4	硅 JFET 中、高频噪声性能	137
5.4.1	沟道热噪声 $i_{nd}$	137
5.4.2	感应栅噪声 $i_{ng}$	140
5.4.3	噪声系数	144
5.5	微波 GaAs MESFET 的噪声性能	145
5.5.1	增强约翰逊噪声 $v_{nd1}$ 、 $i_{ng1}$	145
5.5.2	强场扩散噪声 $v_{nd2}$ 、 $i_{ng2}$	146
5.5.3	噪声系数	148
5.5.4	半经验公式	151
5.5.5	提高噪声性能的途径	153
	参考文献	154
<b>第六章 JFET 与 MESFET 的功率特性</b>		<b>156</b>
6.1	最大输出功率概述	156
6.2	最大输出电流 $I_F$ 与膝电压 $V_{KF}$	157
6.3	漏源击穿电压 $BV_{DS}$	159
6.4	热阻 $R_{th}$	161
6.5	功率 JFET、MESFET 设计考虑	163
6.5.1	结构设计考虑	163
6.5.2	沟道参数设计考虑	169
6.5.3	最大输出功率与频率的关系	169
6.6	功率 JFET、MESFET 举例	170
6.6.1	4 GHz 15 W GaAs MESFET	170
6.6.2	硅埋栅垂直沟道 500 MHz 20 W JFET	171
	参考文献	173

## 第二篇 金属-氧化物-半导体场效应晶体管 (MOSFET)

<b>第七章 MOSFET 的物理基础</b>		<b>175</b>
7.1	理想 MOS 系统	175
7.1.1	半导体表面空间电荷区定性分析	175
7.1.2	半导体表面空间电荷区定量分析	177
7.2	实际 MOS 系统	180
7.2.1	实际 MOS 系统中的氧化层与界面电荷	181
7.2.2	实际 MOS 系统的平带电压	181
7.3	MOS 系统的电容-电压 ( $C-V$ ) 特性	184
7.3.1	理想 MOS 系统的 $C-V$ 特性	184
7.3.2	实际 MOS 系统的 $C-V$ 特性	187
7.4	MOSFET 的开启电压	188
7.4.1	MOSFET 的基本工作原理	188
7.4.2	衬底均匀掺杂 MOSFET 的开启电压	189
7.4.3	离子注入 MOSFET 的开启电压	193

7.5 半导体表面迁移率 .....	196
7.5.1 $\bar{\mu}_n$ 与 $E_x$ 的关系 .....	197
7.5.2 $\bar{\mu}_n$ 与 $E_y$ 的关系 .....	199
7.5.3 $\bar{\mu}_{nmax}$ 与 $N_A$ 、 $N_f$ 的关系 .....	200
7.5.4 $\bar{v}$ 与 $\bar{\mu}$ 的温度效应 .....	201
参考文献 .....	201
<b>第八章 MOSFET 直流特性的一般分析 .....</b>	<b>203</b>
8.1 MOSFET 基本结构 .....	203
8.2 MOSFET 静态伏安特性的定性分析(沟道夹断模型) .....	205
8.3 MOSFET 静态伏安特性的定量分析(常数迁移率情形) .....	206
8.3.1 静态伏安特性的确精表达式 .....	206
8.3.2 静态伏安特性的简化表达式 .....	210
8.3.3 衬底偏压对 MOSFET 伏安特性的影响 .....	214
8.4 饱和区伏安特性与低频小信号漏源电导 .....	215
8.4.1 有效沟道长度调变效应 .....	215
8.4.2 漏沟静电反馈效应 .....	218
8.4.3 空间电荷限制电流 .....	220
8.5 亚(次)开启漏极电流 .....	220
8.6 小尺寸 MOST 的伏安特性 .....	223
8.6.1 开启电压的短沟道效应(SCE) .....	223
8.6.2 开启电压的窄沟道宽度效应(NWE) .....	226
8.6.3 小尺寸 MOSFET 的开启电压 .....	227
8.6.4 小尺寸 MOSFET 的伏安特性 .....	229
8.7 MOSFET 的击穿电压 .....	229
8.7.1 漏衬 pn 结雪崩击穿 .....	230
8.7.2 漏源势垒区穿通 .....	232
8.7.3 短沟道 n 沟 MOSFET 中的负阻击穿与二次击穿 .....	233
8.7.4 栅击穿 .....	235
8.8 漏极电流的温度特性 .....	235
参考文献 .....	240
<b>第九章 MOSFET 直流特性的补充分析 .....</b>	<b>243</b>
9.1 MOSFET 的热电子模型 .....	243
9.1.1 小信号情形 .....	244
9.1.2 大信号情形 .....	246
9.2 MOSFET 伏安特性的全电流分析 .....	249
9.3 次开启漏极电流的理论分析 .....	253
9.3.1 次开启区的半导体表面势分析 .....	253
9.3.2 次开启漏极电流 .....	254
9.3.3 次开启漏极电流的本质 .....	255
9.3.4 界面电荷对次开启漏极电流的影响 .....	256
9.3.5 衬底偏压对次开启漏极电流的影响 .....	259
参考文献 .....	260

第十章 MOSFET 高频小信号性能和瞬变性能 .....	262
10.1 沟道的传输线模拟 .....	262
10.2 内部 MOST 高频小信号 $y$ 参量 .....	263
10.3 内部 MOSFET 高频小信号等效电路 .....	267
10.4 外部 MOSFET 高频小信号等效电路及 $y$ 参量 .....	269
10.5 高频小信号增益 .....	274
10.6 MOSFET 瞬变性能 .....	277
10.6.1 内部 MOSFET 的瞬变性能 .....	277
10.6.2 外部 MOSFET 的瞬变性能 .....	281
10.7 提高高频性能和开关速度的途径 .....	284
参考文献 .....	287
第十一章 MOSFET 的功率性能和噪声性能 .....	289
11.1 MOSFET 功率性能 .....	289
11.1.1 MOSFET 的最大输出功率与安全工作区 .....	289
11.1.2 功率 MOSFET 的导通电阻 $R_{on}$ .....	291
11.1.3 提高 MOSFET 漏源击穿电压的途径 .....	302
11.1.4 热阻 .....	307
11.2 MOSFET 的噪声性能 .....	309
11.2.1 沟道热噪声 .....	311
11.2.2 感应栅噪声 .....	315
11.2.3 产生-复合噪声 .....	316
参考文献 .....	317

### 第三篇 特种场效应晶体管

第十二章 特种场效应晶体管 .....	320
12.1 静电感应晶体管(SIT) .....	320
12.1.1 静电感应晶体管的典型结构 .....	320
12.1.2 静电感应晶体管的工作原理 .....	322
12.1.3 静电感应晶体管的特性 .....	326
12.1.4 静电感应晶体管的用途 .....	328
12.1.5 双极模式静电感应晶体管(BSIT) .....	329
12.2 穿通型晶体管 .....	330
12.2.1 可透基区晶体管(PBT) .....	330
12.2.2 穿通型场效应晶体管 .....	332
12.2.3 空间电荷限制三极管 .....	335
12.3 化学敏场效应晶体管 .....	336
12.3.1 气敏场效应晶体管 .....	336
12.3.2 离子敏场效应晶体管(ISFET) .....	337
12.4 红外光敏场效应晶体管(IRFET) .....	338
12.5 谐振栅场效应晶体管 .....	340
12.6 磁敏场效应晶体管(MAGFET) .....	341

12.7 压电场效应晶体管(PI-MOST) .....	343
参考文献 .....	344
附录 A 杂质密度矩定理('Moment' Theorem) .....	346
附录 B JFET、MESFET 中缓变沟道近似(GCA)适用范围的分析 .....	347
附录 C JFET、MESFET 交流小信号参量中 $\tau_1$ — $\tau_6$ 的表达式 .....	350
附录 D 四端网络噪声性能的特征 .....	351



# 绪 论

## 0.1 场效应晶体管的发展

与双极晶体管相比,场效应晶体管的发展经历了较为漫长而曲折的过程。对它的研究工作可以追溯到本世纪二十年代。当时,为了克服电子管的体积大、耗电多、寿命短、成本高、可靠性差等缺点,激发人们去探索一种新型的固体电子器件。人们首先想到的是模仿电子管工作原理的场效应晶体管。1930年的美国专利记载着利连费尔德(J. E. Lilienfeld)于1926年提出的专利“控制电流的方法和装置”<sup>[1]</sup>。这大概是第一个有正式记载的场效应晶体管。他接连申请三个专利<sup>[2,3]</sup>,最后一个专利中的装置构造如图0-1(a)。其中硫化铜为半导体,两端有欧姆接触以引出电极。金属铝与硫化铜之间由很薄的氧化铝绝缘层隔开。通过加在铝电极与半导体间的电压来控制半导体中的电流。1935年英国专利中记载着海尔(O. Heil)提出的另一个固态放大装置<sup>[4]</sup>,其基本组成部分如图0-1(b)。在半导体层“3”(碲、碘、氧化亚铜、五氧化二钒等)的两端有欧姆接触“1”和“2”。在半导体薄层的两面各有一金属薄层“6”,它与半导体相互绝缘,“8”为绝缘层。把输入讯号加在金属与半导体之间,通过在半导体中感应的电荷来调制半导体中的电流。以上两种装置实际上就是绝缘栅型场效应晶体管或薄膜晶体管。由于当时半导体表面知识不足,上面的研究工作未能产生出可以实用的器件。

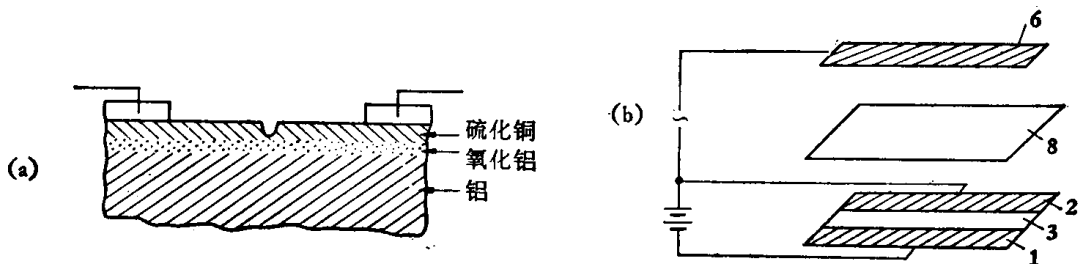


图0-1 早期的场效应晶体管 (a)利连费尔德的装置; (b)海尔的装置

四十年代,美国的贝尔电话实验室也在积极地研究表面场效应晶体管。所用的半导体材料是锗,器件结构与前述利连费尔德和海尔的装置相似。他们集中解决的问题之一是,加于金属控制极的电压对半导体中电流控制作用太弱这个一直未能解决的关键问题。1947年巴丁(J. Bardeen)提出<sup>[5]</sup>,这是由于半导体表面存在着高密度的表面态所致。外电场感应的表面电荷大部分陷落于表面态中而不能参与导电。1948年肖克莱(W. Shockley)等发表的研究结果<sup>[6]</sup>,在实验上证实了表面态的存在及影响。这给研究表面场效应晶体管指明了方向。恰恰在集中研究表面态影响而尚未找到很好的解决办法的时候,巴丁与布拉坦(W. H. Brattain)在表面态研究中多少有些偶然地发明了点接触晶体管<sup>[7]</sup>,其电压增益高达20分贝。从此开始了研究双极晶体管的极盛时代。

在表面态问题尚无法解决的情况下,1952年肖克莱提出一种导电沟道在体内的用pn结作栅的结型场效应晶体管<sup>[8]</sup>(Junction gate Field Effect Transistor. 缩写JFET)。