

谢怀彦著

# 微波场效应 晶体管器件

WEIBO CHANGXIAOYING  
JINGTIGUAN QIJIAN

人民邮电出版社

# 微波场效应晶体管器件

谢怀彦 著

人民邮电出版社

## 内 容 简 介

本书介绍新近发展的微波场效应晶体管的基本性能、网络特性以及用它构成的低噪声放大器、大功率放大器等多种微波器件的工作原理、设计方法和技术性能。另外，探讨了微波场效应晶体管器件对于微波技术领域所起的革新作用和它的发展远景。本书可供在微波通信、卫星通信、雷达、电子对抗、高速逻辑电路、激光通信等技术领域中从事于科研、教学、生产的工作人员参考，也可供大学有关专业的高年级学生参考。

## 微波场效应晶体管器件

谢怀彦 著

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

开本：787×1092 1/32 1982年6月第一版

印张：10 24/32页数：172 1982年6月河北第一次印刷

字数：244千字 印数：1—6,600册

统一书号：15045·总2583-无6183

定价：1.15元

# 前 言

在科学技术迅速发展的领域中，半导体物理学的深入研究起着非常重要的作用，据此创制的各种半导体二极管、晶体管、集成电路等已成为电子技术中的关键器件。特别是微波技术的广泛应用，促进了微波接力通信、卫星通信、雷达、电子对抗、遥感遥测、高速计算机技术等等的进展。

微波场效应晶体管特别是金属半导体场效应晶体管(ME-SFET)在近几年发展很快，在低噪声、大功率、高效率等方面显示出优异的性能。它胜过现有的微波二极管和隧道二极管、崩越二极管甚至体效应管和在一千兆赫以上工作的普通晶体管。它可以用来构成微波技术许多方面的良好器件，例如：低噪声放大器的噪声系数约一、二分贝，接近常温参放的指标；大功率放大器的输出功率可达五瓦或十瓦，有可能代替行波管放大器；振荡器的性能可与体效应管振荡器的相近；混频器除了进行混频外，不但没有变频损耗，反而会获得增益；调制器可以进行高速度脉冲调相和调幅；脉冲直接再生器将简化数字通信系统的中继器。总之，将会促进微波技术的重大革新，使微波通信、卫星通信、雷达等达到更先进的水平。

微波场效应晶体管器件近年来发展很快，资料虽多，但散见于期刊文献中，本书将系统地介绍微波场效应晶体管的基本性能和网络特性，以及用它构成的低噪声放大器、大功率放大器、振荡器、可变增益放大器、脉冲调制器、混频器、限幅器、鉴频器、脉冲再生器、激光通信用调制器和高速逻辑电路等的工

作原理、设计方法和技术性能以及在微波技术领域中的应用。本书将着重阐明微波场效应晶体管器件的主要优点和对于微波通信系统等的固态化、小型化、集成化、低功耗、高可靠和低成本等作出的重大贡献。最后将探讨它的发展方向。

由于作者水平有限，书中缺点错误希望读者批评指正。在编写本书时，得到邮电部第四研究所领导同志的鼓励和支持以及金慧英、林文芳、翟西珍等同志的协助，谨致以衷心的感谢。

作 者

1979, 12

## 主 要 符 号

$FET$	场效应晶体管		
$MESFET$	金属半导体场效应晶体管		
$S$	源极		
$D$	漏极		
$G$	栅极		
$G_1$	第一栅极		
$G_2$	第二栅极		
$L_g$	栅长		
$W$	栅宽		
$a$	层厚		
$N$	掺杂浓度		
$V_P$	夹断电压	$Z_0$	特性阻抗(50Ω)
$V_{DS}$	漏源偏压	$Y_0$	特性导纳(0.02S)
$V_{GS}$	栅源偏压	$Q$	质量因子
$I_{DS}$	漏电流	$f_0$	谐振频率
$I_{DSS}$	饱和漏电流	$f_T$	晶体管特征频率
		$f_{max}$	晶体管最大振荡频率
		$\Delta f, B$	频带宽度
$J$	电流密度	$U$	晶体管单向增益
$q$	电荷	$G$	增益
$\rho$	电阻率	$G_0$	资用增益

$G_1$  转换增益  
 $G_{TV}$  单向转换增益  
 $MAG$  最大资用增益  
 $MUG$  最大单向增益  
 $K$  稳定因子  
 $\eta$  效率  
 $F, NF$  噪声系数  
 $F_0$  本征噪声系数

$F_{min}$  最小噪声系数  
 $F$  整机噪声系数  
 $T$  绝对温度( $^{\circ}K$ )  
 $T_e$  等效噪声温度( $^{\circ}K$ )  
 $VSWR$  驻波比  
 $(S)$  散射矩阵  
 $S_{ij}$  散射参数  
 $MTBF$  平均故障时间

$\sigma$  电导率  
 $\phi$  相移  
 $\theta$  角度  
 $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$  相移常数  
 $\tau$  渡越时间

# 目 录

## 主要符号

第一章 概 论.....	( 1 )
第二章 微波场效应晶体管的特性.....	( 9 )
1. 微波场效应晶体管的结构和等效电路 .....	( 9 )
2. 微波场效应晶体管的特性参数 .....	( 13 )
(1)特征频率 $f_T$ .....	( 13 )
(2)单向功率增益 $U$ 和最大振荡频率 $f_{max}$ .....	( 14 )
(3)最大输出功率.....	( 15 )
(4)噪声特性.....	( 15 )
(5)可靠性.....	( 22 )
第三章 微波场效应晶体管的网络特性和噪声特性.....	( 23 )
1. 散射参数( $S$ 参数 ) .....	( 24 )
2. 微波晶体管二口网络的稳定性 .....	( 28 )
3. 微波晶体管二口网络的增益和等增益圆.....	( 31 )
(1)增益计算公式.....	( 31 )
(2)单向情况.....	( 33 )
(3)双共轭匹配情况.....	( 36 )
(4)晶体管二口网络的等增益圆.....	( 38 )
4. 微波晶体管二口网络的噪声特性和等噪声系数 圆 .....	( 43 )
(1)微波场效应管二口网络的噪声特性.....	( 43 )
(2)晶体管二口网络的等噪声系数圆.....	( 45 )
5. 具有噪声的二口网络的多级联接和噪声量度 ...	( 46 )



<b>第四章 微波场效应晶体管低噪声放大器</b> .....	( 52 )
1. 设计方法和程序 .....	( 54 )
2. 单级低噪声放大器 .....	( 58 )
(1) X波段低噪声放大器 .....	( 58 )
(2) C波段宽频带放大器 .....	( 60 )
3. 多级低噪声放大器 .....	( 66 )
(1) 砷化镓MESFET的特性参数 .....	( 66 )
(2) 放大器的设计 .....	( 69 )
(3) 放大器的性能 .....	( 76 )
4. 用计算机设计(CAD)*的放大器 .....	( 80 )
(1) 选用MESFET .....	( 80 )
(2) 设计第一级的输入网络 .....	( 81 )
(3) 设计中间网络 .....	( 86 )
(4) 设计输出网络 .....	( 87 )
(5) 多级联接 .....	( 88 )
(6) 稳定性分析 .....	( 90 )
5. 致冷的低噪声放大器 .....	( 93 )
(1) 致冷的MESFET的特性 .....	( 93 )
(2) 致冷低噪声放大器的设计和性能 .....	( 97 )
<b>第五章 微波场效应晶体管大功率放大器</b> .....	( 102 )
1. 大功率场效应晶体管 .....	( 102 )
2. 单级大功率放大器 .....	( 105 )
3. 多级大功率放大器 .....	( 110 )
4. 宽频带大功率放大器 .....	( 116 )
<b>第六章 微波场效应晶体管振荡器</b> .....	( 124 )
1. 微波场效应管振荡器的特点 .....	( 124 )
2. 微波场效应管振荡器的功率、频率和网络 参数 .....	( 127 )

3. 小功率振荡器 .....	( 133 )
(1)小功率振荡器的电路设计 .....	( 133 )
(2)小功率振荡器的性能 .....	( 138 )
4. 大功率振荡器 .....	( 146 )
(1)振荡器电路结构和它的设计程序 .....	( 147 )
(2)小信号特性分析 .....	( 148 )
(3)有源网络和它的大信号特性 .....	( 152 )
(4)振荡器的微波性能 .....	( 154 )
5. 高稳定低噪声振荡器 .....	( 157 )
(1)稳定前的振荡器性能 .....	( 157 )
(2)介质谐振腔 .....	( 158 )
(3)振荡器与谐振腔之间的耦合 .....	( 160 )
(4)稳定振荡器的微波性能 .....	( 168 )
6. 宽频带调谐振荡器 .....	( 171 )
(1)钇铁石榴石调谐振荡器 .....	( 172 )
(2)变容管调谐振荡器 .....	( 190 )
7. 注入锁定振荡器 .....	( 192 )
8. MESFET倍频器 .....	( 198 )
<b>第七章 可变增益放大器和脉幅调制器 .....</b>	<b>( 202 )</b>
1. 双栅 MESFET 的特性 .....	( 203 )
(1)双栅MESFET的结构和S参数 .....	( 203 )
(2)增益与第二栅阻抗的关系 .....	( 205 )
(3)增益调制与第二栅偏压的关系 .....	( 210 )
(4)噪声性能和功率容量 .....	( 212 )
2. 可变增益放大器 .....	( 218 )
(1)可变增益放大器的电路设计 .....	( 219 )
(2)可变增益放大器的性能 .....	( 224 )
3. 高速脉冲振幅调制器 .....	( 228 )

4. 二相相移键控( <i>PSK</i> )调制器	( 230 )
<b>第八章 混频器、限幅器和鉴频器</b>	( 232 )
1. 单栅 <i>MESFET</i> 混频器	( 232 )
(1)在 <i>MESFET</i> 中的变频	( 233 )
(2)电路分析	( 236 )
(3)实验结果	( 243 )
2. 双栅 <i>MESFET</i> 混频器	( 252 )
3. <i>MESFET</i> 限幅器	( 253 )
(1)单栅 <i>MESFET</i> 限幅器	( 253 )
(2)双栅 <i>MESFET</i> 限幅器	( 255 )
4. <i>MESFET</i> 鉴频器	( 257 )
(1) <i>MESFET</i> 鉴频器的设计	( 258 )
(2) <i>MESFET</i> 鉴频器的性能	( 263 )
<b>第九章 脉冲直接再生器、激光通信调制器和高速集成逻辑电路</b>	( 265 )
1. 脉冲直接再生器	( 265 )
(1)脉冲再生原理	( 266 )
(2) <i>MESFET</i> 相位再生器的特性	( 269 )
(3) <i>MESFET</i> 相位再生器的实验结果	( 274 )
2. 激光通信调制器	( 277 )
(1)激光通信脉冲编码调制器	( 277 )
(2)激光通信脉冲振幅调制器	( 290 )
3. 高速集成逻辑电路	( 293 )
(1)砷化镓 <i>MESFET</i> 的特性及大信号开关响应	( 294 )
(2) <i>MESFET</i> 的逻辑电路	( 296 )
<b>第十章 综合应用和发展远景</b>	( 304 )
1. 综合应用	( 304 )
2. 发展远景	( 305 )

(1) 微波场效应管器件的发展 ..... ( 306 )

(2) 微波场效应管在微波技术领域中起的革新作用 ..... ( 311 )

附 录

A、微波晶体管的[S]参数的微波测量方法 ..... ( 315 )

B、微波振荡器的调频噪声和调幅噪声 ..... ( 318 )

C、噪声系数( $F$ )与等效噪声温度( $T_e$ )的关系 ..... ( 325 )

参考文献

# 第一章 概 论

在微波技术领域，电子器件是关键性的器件。从前主要使用电子管，例如速调管、行波管等。其后广泛采用半导体二极管( $pn$ 结)，例如变容管、检波管、开关管、混频管、体效应管和崩越管等，近年来在微波波段开始采用晶体管。在四千兆赫以下使用双极晶体管，而在更高频段则使用场效应晶体管。目前看来，微波场效应晶体管不但特性优越，而且具有多种功能。应用它可以构成性能良好的低噪声放大器、大功率放大器、可变增益放大器、振荡器、混频器、调制器、移相键控器等。因此，在微波通信、雷达、电子对抗等领域中，微波场效应晶体管的作用将越来越大。

普通晶体管的电气结构是 $pnp$ 结或 $npn$ 结，其中有两种载流子（电子和空穴）起导电作用，故叫做双极晶体管。它有三个电极：集电极( $C$ )、基极( $B$ )、发射极( $E$ )。因而它是一种三端口器件。场效应晶体管的物理结构是一个整片半导体材料（例如砷化镓或硅），而没有 $pnp$ 结或 $npn$ 结。但是，这个整片半导体材料的电流通路（也叫沟道）受到外加电压（电场）的作用时，在其中只有一种载流子起导电作用，故叫做单极晶体管。它也有三个电极：漏极( $D$ )、栅极( $G$ )、源极( $S$ )。因而它也是一种三端口器件。

由于栅极的物理结构不同，现有三种场效应晶体管：①金属半导体场效应管( $MESFET$ )，在它的栅极上，金属同半导体直接接触，出现肖特基势垒，形成耗尽层；②结型场效应

管 (*JFET*)，在它的栅极上，制成 *pn* 结，也形成耗尽层；  
③金属氧化物半导体场效应管 (*MOSFET*) 或绝缘栅场效应管 (*IGFET*)，在它的栅极上，金属和半导体材料之间有氧化层，形成电容，其下有感生沟道或扩散沟道，前者叫增强型 (栅偏压为正)，后者叫耗尽型 (栅偏压为负)。

普通晶体管和场效应管的物理概念由肖克来 (*W·Schokley*) 分别在1949年和1952年提出。在近二三十年间，这两类晶体管都有很大的发展。应当指出，同其它半导体器件一样，总是力图使所设计的晶体管器件工作在更高的频段上。在微波波段以下，普通晶体管和场效应管都各有广泛的用途。而近年来正努力使普通晶体管和场效应晶体管都能良好地工作在微波波段。但是就目前技术水平来说，在微波波段，场效应晶体管比起双极晶体管在低噪声、大功率、高增益等性能方面显得十分优越 (特别是在二千兆赫以上)。存在这种差异的根本原因在于场效应晶体管是单极晶体管，其中只有一种载流子起导电作用，因而不必考虑少数载流子的寿命和迁移率，也不会出现两种载流子的复合问题。因此可以选用一种对电子有最佳导电机理而对空穴有较差性能的材料。其结果是渡越时间很短，本征噪声很低，这些特点对于微波器件都是非常重要的。其次是在场效应晶体管结构中，易于实现亚微米尺寸的小型化，这也是有利于制作在微波波段工作的器件。

场效应管的研制在1962年以前进展不大，主要因为场效应管所要求的杂质分布的数值和容差比起普通晶体管来难于做到，它要求在两个比较厚的相反导电类型的重掺杂层之间有一个薄的轻掺杂层。就制造工艺来说，问题在于要在两个相当大的量之间控制一个很小的差异，以便得到一个精密的中间层。因而场效应管的发展过程，就是寻求该管制作工艺的过程。近

来采用了双扩散法或外延—扩散法，已使它成为一种成熟的器件。特别是金属氧化物半导体场效应管(MOSFET或MOST)广泛应用在低频的线性电路和数字电路中。这类器件通用的材料为硅，而氧化层为氧化硅，即为Si-SiO<sub>2</sub>系列。

虽然场效应管的三种类型(MESFET、JFET、MOSFET)都可能在微波波段应用。但是目前在微波波段占主导地位的是MESFET，主要原因是由于制造工艺上存在一些问题。例如，就JFET来说，用扩散法或注入法很难精确地确定P传导区。而MOSFET(IGFET)目前只能在硅材料上制作，很难在砷化镓材料上制作。由于硅中的导电电子的迁移率比起砷化镓中的导电电子的迁移率小得多，故在微波波段硅管的性能大为下降。因而，微波场效应管同在低频通用的场效应管的主要差别在于下列三点：①栅极物理结构用金属—半导体接触(MES)，而不用金属—氧化物—半导体接触(MOS)；②材料用砷化镓(GaAs)，而不用硅(Si)；③导电机构用电子导电(n型)，而不用空穴导电(p型)。所以，微波场效应晶体管的特征简明地可用符号表示为n-GaAs MESFET。

微波场效应晶体管(MESFET)除了单栅结构外，还有双栅结构。双栅MESFET比单栅MESFET有更高的增益和更小的反馈电容。改变它的第二栅的直流偏压，可以在很宽范围内改变增益；因此可以构成可控增益放大器。此外，增益调制响应是很快的；射频载频的脉幅调制的升降时间小于100微微秒。

现在再来看微波场效应管(MESFET)的高频极限。它的高频极限取决于材料参数和器件结构。在GaAs和Si中，电子(n)比空穴(p)有更高的迁移率。故在微波波段，只用n型沟道的场效应晶体管。又把GaAs同Si相比，电子迁移率要高

六倍(掺杂浓度为 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ),最大漂移率要高二倍。在GaAs和Si中,饱和速度是大约相等的。于是,在GaAs中比在Si中,寄生电阻较小,跨导较大,而在高场区的渡越时间更短。其结果是,GaAs MESFET比之Si MESFET,电流增益频宽积( $f_T$ )约高二倍;最大振荡频率约高三倍。如果就器件几何结构来说,最临界参数是栅长( $L_g$ )。减少了栅长,就减少了电容( $C_{gs}$ )和跨导( $g_m$ ),因而就会改善电流增益频宽积( $f_T$ )。对于短栅长的MESFET, $f_T \propto 1/L_g$ 。为了能在高频率工作,应当采用一定工艺把栅长减少到最小尺寸。通常的光刻和投影掩模工艺使栅长只能做到 $1 \mu\text{m}$ 。要把栅长减少一个数量级,应当用X射线或电子束来光刻。当栅长( $L_g$ )大约等于沟道厚度( $D$ )时,就限制了有效栅长的减少。为了保持 $L_g/D > 1$ ,沟道厚度应随栅长减少而减少。这意味着要采用高掺杂水平(但要注意击穿现象)。因此,要提高微波场效应晶体管的高频极限,就要考虑采用电子迁移率和漂移速度更高的材料(如GaAs、InP、In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As、InAs<sub>x</sub>P<sub>1-x</sub>等),同时使用亚微米栅长( $0.5 \mu\text{m}$ 或 $0.25 \mu\text{m}$ )。

在微波波段(特别是在二千兆赫以上),MESFET目前已取得十分显著的成效,如很低的噪声系数和相当高的功率放大性能。其主要原因是利用了砷化镓材料和精确地控制了两个临界尺寸(栅长和沟道厚度)。

我们再详细讨论一下晶体管特性同所用半导体材料的关系。

晶体管能否用在更高的微波波段和具有更大的功率容量,主要取决于所用的半导体材料和制造工艺,不管是普通晶体管还是场效应管,从理论上来说,它的最大允许电压和截止频率由下式决定:



$$V_m f_T = E v_s / 2\pi \quad (1.1)$$

式中： $V_m$ ——元件上的最大允许电压

$f_T$ ——截止频率、特征频率或电流增益带宽积（如共源电路短路下电流增益为一时的频率）

$E$ ——半导体材料的击穿电场

$v_s$ ——半导体中载流子的饱和漂移速度。

此外，晶体管的特征频率 $f_T$ 与载流子在半导体内的渡越时间 $\tau$ 有下列关系：

$$f_T = \frac{1}{2\pi\tau} \quad (1.2)$$

在场效应管中， $\tau$ 是从源极到漏极的总渡越时间。由于半导体材料内部的载流子的漂移速度会达到饱和值，故渡越时间有最小值，这取决于半导体材料和尺寸。在场效应管中，栅长（沟道长度）越小，载流子经过它所需的渡越时间就越短，但是由于电击穿，它的最大允许电压也会下降。因此， $V_m f_T$ 乘积有一个极限值。

常用的半导体材料有锗(Ge)、硅(Si)和砷化镓(GaAs)。它们的 $V_m f_T$ 值分别为 $10^{11}$ 、 $2 \times 10^{11}$ 或 $10 \times 10^{11}$ 。故硅管为锗管的二倍，而砷化镓管为锗管的十倍，为硅管的五倍。目前，常用硅管的 $V_m f_T$ 值为 $10^{11}$ ，如果集电极电压为10伏（ $V_m = 10$ 伏），则 $f_T = 10$ 千兆赫。故硅管的工作频率只能到几千兆赫，在更高的频段还不能良好地工作。但是，砷化镓却很有希望，如果 $V_m = 10$ 伏，则 $f_T = 100$ 千兆赫，故可以在10甚至20千兆赫良好地工作。或者，如果提高最大允许电压，则可以在较低频段得到大功率器件。

如前所述，晶体管是三端口器件，比起像半导体二极管那样的二端口器件来说，它的输出端的变化对于输入端的特性只