



全国高技术重点图书·微电子技术领域

李效白 编著

微电子学丛书

砷化镓微波功率场效应 晶体管及其集成电路

科学出版社

TN385
L37

410312

微电子学丛书

砷化镓微波功率场效应
晶体管及其集成电路

李效白 编著



科学出版社

1998

内 容 简 介

本书重点介绍砷化镓微波功率场效应晶体管及其集成电路的实用制作技术。全书共八章,前四章主要叙述砷化镓场效应晶体管的设计与制作技术,后四章分别介绍了正在蓬勃发展中的单片微波集成电路、砷化镓场效应晶体管在混合微波集成电路中的应用,以及高电子迁移率晶体管和真空微电子器件。

本书以作者 30 余年的研究工作实践为依托,所述内容具有较强的实用性。既可以作为大学半导体专业、微电子专业师生的教学参考书,也可供在相关领域从事科研工作的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

砷化镓微波功率场效应晶体管及其集成电路/李效白 编著. —北京:科学出版社,1998. 2

(微电子学丛书/王阳元主编)

ISBN 7-03-006082-2

I. 砷… II. 李… III. 砷化镓晶体管:场效应晶体管-微波半导体器件
IV. TN385

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 21310 号

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

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

*

1998 年 2 月第 一 版

开本: 850×1168 1/32

1998 年 2 月第一次印刷

印张: 16 5/8

印数: 1—900

字数: 434 000

定价: 35.00 元

《微电子学丛书》编委会

顾 问：黄 昆 林兰英 谢希德 王守武 王守觉

童志鹏 李志坚 姜均露 王寿云

主 编：王阳元

编 委（以姓氏笔画为序）：

马俊如 万 群 王芹生 王永文 王阳元

王忠烈 仇玉林 白 丁 李佑斌 许居衍

许振嘉 陈星弼 陈 贤 汤小川 严晓浪

张义门 张利春 张 敏 郑敏政 宗祥福

洪先龙 俞忠钰 钱佩信 唐璞山 徐元森

徐雅文 徐筱棣 黄 敞 梁春广 梁骏吾

韩汝琦 熊和生 魏 玲 魏道政

秘 书：赵宝瑛

《微电子学丛书》序

微电子学是源于并脱胎于固体物理和无线电电子学的一门新兴的边缘性技术学科。历史地说,1948年晶体管的发明、1958年采用硅平面工艺的集成电路的诞生和1971年微处理器的出现是微电子学发展史上的几个重要里程碑。经过46年的发展,微电子产业已成为战略性的基础产业,微电子科学技术已成为现代科学技术的关键技术基础。据统计,现在世界上65%的行业与微电子技术有关。二次大战后,美国正是抓住了以微电子技术为基础的电子信息技术,才使其经济起飞的。日本和亚洲一些国家和地区也都是抓住了这一点而使其经济振兴。按预测,一直到2020年,世界集成电路产业的产值仍将以年增长率13%的速度增长;技术上也仍保持着集成度年增长率为46%的速度继续发展。到2000年以微电子为基础的电子信息产业将成为世界第一大产业。因此,微电子科学技术乃是20世纪下半叶直到21世纪上半叶科学技术竞争的焦点。谁掌握了微电子技术,谁就掌握了主动权。当前,微电子产业规模和技术水平已成为衡量一个国家综合实力的主要标志之一。日本有人提出,把半导体工业总产值占工农业总产值的0.5%作为进入信息社会的标志是不无道理的。

当前,我国微电子产业和科学技术的发展水平远不能适应国民经济和国防建设发展的需要。我国集成电路的市场份额只占世界集成电路市场的0.33%,与我国社会主义大国的地位极不相称。国内市场的占有率,无论是品种还是数量,也只占20%左右。我国微电子产业和科学技术的落后面貌已成为我国四个现代化建设的制约因素。党和国家的领导已把发展微电子作为一项战略措施放到了突出的地位。在这样的形势下,编写出一套高质量的、反映世界微电子学发展前沿和我国微电子科学技术成果的丛书,必

将促进我国微电子产业建设和科学技术的发展。

这套丛书不同于一般的通俗读物和科普读物,也不同于大学教材,它是一套反映微电子学主要研究领域里学科发展前沿问题的著作,以满足微电子学领域里的研究部门、教育部门和产业部门的需要,成为工作在第一线科技人员的参考书。当然它也可成为大学生和研究生的教学参考书。我们要求每本著作都要具有科学性、先进性和实践性,而整套丛书又要有系统性。我们计划在“八五”期间开始出版,到2000年前出版10种左右,2000年后还要继续搞下去,使其成为跨世纪的出版物。这个工作的意义不亚于建一个工厂,建一个研究所。

倡议编写这套丛书的是国防科工委微电子专业组、全国集成电路计算机辅助设计(ICCAD)专家委员会和 ICCAT 专家委员会的部分专家们,他们的倡议得到了全国各有关单位微电子专家的支持和赞同,从而形成了一个报告。这个报告得到当时机械电子工业部电子科学学院院长童志鹏教授的批准。因此,当我们庆祝《微电子学丛书》开始出版的时候,要特别感谢童志鹏教授的睿智。编写丛书的倡议还得到了国家计委科技司,国防科工委科技委、预研局、四局,国家科委基础研究高技术司,原机械电子工业部微电子与基础产品司和科学出版社等有关领导的支持,使出版这套丛书的愿望得以实现。在此,我们谨向上述领导部门表示由衷的谢意。

我们要感谢老一辈的科学家、我们的老师和有关领导部门的负责人,他们应聘担任丛书编委会的顾问,这对于保证丛书的学术质量将是十分重要的。我们相信,在他们的关心、支持和指导下,丛书的出版必将能达到预期的目的。

担任本丛书编委的都是一批活跃在微电子领域科研、生产和教育单位的中青年科技专家,他们团结在一起,互相切磋、共同探索,必能攀登一个又一个科学高峰。

“书山有路勤为径,学海无涯苦作舟”。愿为丛书的出版而耕

耘不息。

我们期望得到同行们的更多指正,更多支持。

王阳元

于北京大学

1994年5月

序

微波功率晶体管的研究已有 40 多年历史. 50 年代初研制的锗合金功率管, 由于基区宽度有几十微米, 工作频率只能达到低频和中频范围. 50 年代末由于采用合金扩散和台面制造技术, 将工作频率推进到短波和超短波频段, 但尚未进入分米波范围.

60 年代初, 由于硅薄层外延技术、平面工艺技术迅速发展, 采用双扩散和光刻技术可使基区宽度缩小到 $1\mu\text{m}$ 以下, 发射极条宽仅 $5\mu\text{m}$, 因此硅平面晶体管一问世, 其工作频率就立即进入超高频范围. 1964 年做出了第一只频率 500MHz、输出 5W 的超高频功率管. 随着移动通信、相控阵雷达及电子装备的发展以及对固态化、小型化的迫切需求, 在 60 年代至 70 年代的 20 年中, 研制出数百个系列的硅微波功率管、超线性微波功率管、低压微波功率管和脉冲微波功率管. 用于通信、雷达的硅微波功率管, 主要工作在 P, L, S 三个频段, 采用双离子注入工艺和 $0.5\mu\text{m}$ 线宽的光刻技术, 可使硅微波晶体管在 10GHz 下输出 1W 功率. 采用多层金属化和表面钝化措施可使硅微波功率管的可靠性大大提高, 其失效率可降低到 10Fit. 在管壳内采用网络匹配技术可获得功率合成的理想效果, 当前 S 波段的脉冲功率管在 $3.1\sim 3.5\text{GHz}$ 下可达到 60W 输出功率, L 波段脉冲功率管在 $1.2\sim 1.4\text{GHz}$ 下输出功率大于 200W, 通过管外的功率合成技术, 可制成输出达几十千瓦的功率模块.

随着电子信息技术的飞速发展, 更高的信息容量和传输速率要求半导体器件的工作频率进一步提高. 人们通过多年探索找到了一种新的半导体材料——砷化镓(GaAs). GaAs 中的电子迁移率是硅(Si)中电子迁移率的 6 倍, 其电子峰值漂移速度是 Si 的 2 倍, 因此 GaAs 器件具有比 Si 优越的性能. 1967 年第一只 GaAs-

FET 问世,揭开了新一代微波半导体器件研究的序幕,经过近 30 年的努力,当前砷化镓功率场效应管可在 14.5GHz 下输出 20W 功率.

砷化镓场效应管工作频率的进一步提高将受到载流子迁移率的限制,1980 年日本富士通等公司采用调制掺杂超晶格技术研制出第一只高电子迁移率晶体管(HEMT),由于非掺杂的 GaAs 沟道的载流子具有非常高的迁移率,因此 HEMT 可工作在毫米波范围.为了进一步提高 HEMT 的工作频率,人们采用比 GaAs 具有更高电子迁移率的 InGaAs 材料作为场效应管沟道,InGaAs 沟道和相邻两边的 AlGaAs 和 GaAs 形成一个势阱,有利于对载流子的限制,具有较高的二维电子气浓度和较低的输出电导,这种器件人们称之为 PHEMT,1985 年第一只 PHEMT 研制成功,10 年来发展迅速,当前 PHEMT 可在 93.5GHz 下获得几十毫瓦的输出功率,并制成了微波毫米波集成电路(MIMIC).

本书作者从事微波功率管研制历 30 余年,熟悉设计理论和制作技术,积累了丰富的专业知识和经验.本书论述深入浅出,内容取材广泛,收集了国外最新的研究成果.书中介绍了砷化镓微波功率管的产生背景、发展过程、原理与设计、工艺制造技术、单片电路、混合集成电路等.由于硅微波功率管的论著较多,而砷化镓等化合物半导体微波功率管的著作极少,希望本书的出版能为半导体物理、半导体器件、微电子技术领域的大学教师、大学高年级学生,以及科学技术人员提供一本有价值的参考书,能为我国半导体事业的发展贡献一份力量.

王长河

1996 年 10 月 30 日

目 录

《微电子学丛书》序

序

第一章 绪言	(1)
第二章 砷化镓微波场效应管设计	(7)
2.1 工作原理	(7)
2.2 电学设计	(12)
2.3 结构设计	(29)
2.4 可靠性设计	(38)
2.5 低噪声 FET	(50)
2.6 双栅 FET	(56)
第三章 砷化镓材料	(66)
3.1 材料性质	(66)
3.2 单晶生长	(71)
3.3 离子注入	(79)
3.4 气相外延	(90)
3.5 分子束外延	(95)
3.6 化学束外延和其它	(104)
第四章 砷化镓微波场效应管制作工艺	(112)
4.1 湿法腐蚀	(112)
4.2 图形光刻	(121)
4.3 欧姆接触形成	(155)
4.4 肖特基势垒形成	(186)
4.5 钝化	(194)
4.6 干法腐蚀	(220)
4.7 空气桥和通路孔	(242)
4.8 装架	(252)
4.9 质量控制	(256)

4.10	测试	(259)
4.11	内匹配	(277)
第五章	砷化镓微波单片集成电路	(299)
5.1	概述	(299)
5.2	设计考虑	(303)
5.3	集总元件	(311)
5.4	偏置电路	(330)
5.5	单片电路制作工艺	(333)
5.6	微波探针测试系统	(339)
5.7	侦片修正	(345)
5.8	放大器	(347)
5.9	振荡器	(356)
5.10	混频器和倍频器	(364)
5.11	移相器	(370)
5.12	微波开关和衰减器	(378)
5.13	单片机	(385)
5.14	毫米波单片电路	(387)
第六章	管芯和单片封装	(394)
6.1	微波封装特点	(395)
6.2	设计考虑	(396)
6.3	管壳参数设计	(405)
6.4	管壳制造工艺	(409)
第七章	砷化镓微波混合集成电路	(416)
7.1	引言	(416)
7.2	直流偏置	(418)
7.3	FET 非线性分析	(421)
7.4	微波设计	(427)
7.5	放大器	(444)
7.6	其它电路	(452)
7.7	管壳封装模块	(458)
7.8	模块	(461)
7.9	T/R 组件	(468)
第八章	高电子迁移率场效应管和真空场效应管	(476)

8.1	二维电子气	(476)
8.2	材料结构演进	(479)
8.3	工艺技术要点	(485)
8.4	毫米波器件和电路举例	(491)
8.5	传导沟道参数	(498)
8.6	真空场效应管简述	(512)

第一章 绪 言

电子技术产业是现代国民经济的神经中枢,微电子技术是电子技术的中坚力量,锗(Ge)、硅(Si)及其集成电路引发了现代产业革命,深刻地影响着社会生活的方方面面,继 Ge, Si 之后,砷化镓(GaAs)器件及其集成电路在微波、毫米波通信和军事领域显示出它的重要性。

1952 年, Shockley 提出结型场效应晶体管理论之后,单极晶体管发展成为半导体器件的重要分支. Ge, Si 器件轰轰烈烈地发展并在产业部门得到广泛的应用,相比之下, GaAs 器件的发展一直步履艰难,当时的主要障碍是材料制备技术不过关,这种局面一直延续到 60 年代末期。

由于材料结构的自身特点, GaAs 器件一开始就采用了单极型模式. 1967 年, Turner 采用扩散栅极结构, 首先制成了 GaAs-FET. 但是后来, 扩散技术没有被广泛采用. 1970 年, 半绝缘 GaAs 衬底上薄层外延技术得到了长足发展, 促成了 GaAs MESFET (砷化镓金属半导体场效应管) 的研制工作, 出现了小信号、低噪声 GaAs 器件 (Wolf, P., 1970 年)。

1971 年, Turner 等制成栅长为 $1\mu\text{m}$ 的 GaAs MESFET, 频率达到 18GHz, 仍为低噪声品种. 1971 年, Furnel 制成了双栅 GaAs MESFET. 1973 年在国际固体电路会议上宣布诞生了微波功率 GaAs MESFET. 据日本富士通公司报道, 该器件 1972 年的实验室水平为 2GHz, 1.6W, 美国 RCA 公司报道同年的水平为 4GHz, 0.8W, 美国威斯汀豪斯公司 1973 年制出了 3GHz, 1W 的器件. 而在 1972 年的国际固体微波会议上, 有人曾认为 GaAs MESFET 能否成为功率器件还是个值得讨论的问题, 所以真心实意想搞 GaAs 功率器件的人并不多. 尽管 1973 年有这么两三家公司率先在 GaAs 功

率器件领域取得了突破,但人们还是普遍认为,GaAs 热导率太低,不利于发展功率器件,大家只对低噪声器件感兴趣,原因是它的噪声性能优于其它固态器件,所以小信号、低噪声 GaAs MESFET 获得了突飞猛进的发展。

到了 1974 年,在国际电子器件会议上,日本富士通公司宣布制出了 10GHz、0.7W 及 8GHz、1.6W 的 GaAs MESFET,最高振荡频率 $f_{\max}$ 已达 50GHz. 富士通公司突破了 X 波段瓦级大关,功率 GaAs MESFET 成了热门器件. 尽管当时三大技术难点(衬底质量不高且价格昂贵、界面工艺技术不成熟、性能不稳定)还没有突破,但用其替代硅和电真空器件的诱人前景驱使许多厂商和政府军事部门差不多同时采取了行动,到 70 年代末期,仅在美国硅谷地区就有 11 家公司生产功率 GaAs MESFET.

经过 20 余年的发展,GaAs 器件已经成为电子工业中的门类齐全的器件产业、军事电子的重要领域. 它的产品门类包括微波分立器件、微波混合集成电路、微波模拟和数字单片集成电路,前锋以 GaAs 为代表,和其它化合物半导体(如 InP)相结合向着毫米波和光电集成发展. 它的应用领域包括陆地、航海、航空、卫星的微波通信和检测系统,在电子战武器系统中也占有重要的位置.

90 年代初期,功率 GaAs MESFET 的发展水平见表 1.1. 目前国际上总的发展趋势是高功率、高效率、高线性、高增益和高可靠性,低电压、低功耗和低成本.

由于设计技术和工艺加工方法日臻成熟,在全球个人移动通信、卫星广播电视、空中交通管理、汽车防撞雷达、公路交通控制、其它仪表和消费类产品巨大市场的强力推动下,GaAs 电路近几年在宽广的频率范围蓬勃发展起来,其中 MMIC(单片微波集成电路)发展势头更为迅猛.

由于 MBE(分子束外延)、MOCVD(金属氧化物化学气相沉积)等材料生长技术与 EB(电子束)等微细加工技术相结合,诞生了 GaAs,InP 等异质结高电子迁移率器件. 近年来,HEMT(高电子迁移率晶体管)、PHEMT(赝配高电子迁移率晶体管)和 MIM-

IC(毫米波单片集成电路)成了若干国际会议的热门主题,许多公司竞相研究,军事部门也倾注了极大的兴趣,吸引了政府的不少投资.表 1.2 列出了毫米波 PHEMT 的发展水平.

表 1.1 国外功率 GaAsFET 产品水平¹⁾

产品型号	主要技术指标	公司名称	备 注
NE13783-4	41.8dBm ²⁾ ,12GHz,5dB	日本电气	芯 片
NE900400G	31dBm,20GHz,6dB	日本电气	芯 片
JS8855-As	31dBm,18GHz,6dB	日本东芝	芯 片
JS8894-As	27dBm,23GHz,6dB	日本东芝	芯 片
JS8864-As	22.5dBm,30GHz,4.5dB	日本东芝	芯 片
TIM4450-30L	45dBm,4.4~5.0GHz,9.5dB	日本东芝	管壳封装
TIM5964-30L	45dBm,5.9~6.4GHz,8.0dB	日本东芝	管壳封装
TIM6472-30L	45dBm,6.4~7.2GHz,7.5dB	日本东芝	管壳封装
TIM7785-30L	45dBm,7.7~8.5GHz,6.0dB	日本东芝	管壳封装
FLM3742-25D	44dBm,3.7~4.2GHz,11.5dB	日本富士通	管壳封装
FLM4450-25D	44dBm,4.4~5.0GHz,10.5dB	日本富士通	管壳封装
FLM5964-25D	44dBm,5.9~6.4GHz,9.5dB	日本富士通	管壳封装
FLM6472-25D	44dBm,6.4~7.2GHz,8.5dB	日本富士通	管壳封装
FLM0910-8C	38.5dBm,9.5~10.5GHz,6.0dB	日本富士通	管壳封装
FLM1011-8D	38.5dBm,10.7~11.7GHz,5.0dB	日本富士通	管壳封装
FLM1213-8C	38.5dBm,12.7~13.2GHz,5.5dB	日本富士通	管壳封装
FLM1414-8C	38.5dBm,14~14.5GHz,5.0dB	日本富士通	管壳封装

1) 实验室已获得 14.5GHz,40dBm 的 FET 芯片,合成得到 43.2dBm;12GHz,10W 的 HFET 芯片,效率高达 50%.

2) dBm 为国际通用的功率计量单位,0dBm = 1mW,30dBm = 1W, $P(\text{dBm}) = 10\lg P(\text{mW})$.

表 1.2 国外毫米波 PHEMT 水平

工作频率	主要技术指标	公司名称
60GHz	715mW, 13dB, MIMIC	TRW
55GHz	219mW, 4.1dB	Toshiba
43~46GHz	750mW, 10~11dB, MIMIC	Raytheon
94GHz	62.7mW, 4.0dB	
94GHz	100mW, 32dB, MIMIC	TRW
100GHz	5dB, 5~100GHz, 分布式放大器	Varian
95GHz	$G_P=8.2\text{dB}$, $N_F=1.3\text{dB}$	
110GHz	$G_P=19.6\text{dB}$, $N_F=3.9\text{dB}$, MIMIC	
113GHz	$G_P=15.6\text{dB}$, $N_F=3.4\text{dB}$, MIMIC	
8GHz	8.09W, 12.67dB, 55.8%(PAE ¹⁾)	Raytheon
2.3~2.6GHz	41.4W, 14.2dB, 52.6%(PAE)	Raytheon
3.7~4.2GHz	11W, 13dB, 60%(PAE)	Avantek
12GHz	6W, 11.5dB, 52%(PAE)	Mitsubishi
16GHz	7W, 4.5dB, 30.8%(PAE)	Texas

1) PAE 表示功率附加效率, 见后 η_{add} .

GaAs 器件与电路的持续发展, 主要基于它有如下优点:

(1) 在 GaAs 中, 传导电子迁移率比 Si 中大 5 倍, 电子峰值漂移速度比 Si 中大 1 倍, 寄生电阻较小, 跨导较大, 电子在高场区内渡越时间较短. 因此 GaAs 器件可获得比 Si 更高的工作频率和放大增益, 从而可能将双端口固态器件向微波高端扩展, 而此前在该频段双端口器件一直使用磁控管和速调管一类的热电子器件.

(2) Si, Ge 材料本征电阻率不高, 而 GaAs 有源层可生长在自身电阻率大于 $10^7 \Omega \cdot \text{cm}$ 的半绝缘衬底上, 因而可以通过把压点放在衬底上的办法来消除栅极压点上产生的大寄生电容, 便于低损耗互连和高密度封装下的隔离, 集成方便.

(3) 从器件结构和加工工艺上来说, 需要精确控制的尺寸相

对比较容易,也比较少(只有栅长和沟道厚度),因此便于实现微细加工以达到更高的性能,实现多种多样的 FET 结构和小型化等。

(4) 在输出功率和工作频率相近的情况下,肖特基势垒比 pn 结的输入阻抗要高,器件的反向隔离度较大,因此便于使用。

(5) 和二极管(如 IMPUT, Gunn)相比, GaAs 器件噪声低、效率高、使用方便。和双极型器件相比, GaAs MESFET 不存在基区电导调制效应,因此线性较双极性器件好,三阶互调失真测量结果表明优于 5~10dB; GaAs MESFET 是多子器件,而且栅下没有电荷存留的氧化层,因此本征上具有抗中子、 γ 光子辐照的能力,在导弹、核武器、航天使用中具有优越性。和真空电子管相比,电子管的输出功率一般来说要大得多,但电子管的噪声、线性、增益平坦度等则差得多,尤其是寿命一般来说要短得多。

GaAs 和 InP 等化合物半导体材料异质结器件有更多的本征优点,详见第八章。

基于上述情况,我国早在 1970 年就开始低噪声 GaAs MESFET 的研究工作,并于 1978 年设计定型了国内第一个砷化镓微波低噪声场效应管;1974 年开始研究砷化镓功率器件,并且在 1980 年国内首次定型砷化镓微波功率场效应管。此后研究范围扩展到数字电路、模拟电路和毫米波领域,在微波通信、航天等多方面得到了广泛的使用。

有多种结构的砷化镓场效应管,如 HFET(异质结场效应管), MISFET(金属氧化物半导体场效应管), JFET(结型场效应管)等,本书主要叙述 GaAs MESFET(本书下文简称 GaAs FET 或 FET)。它包括数字、模拟两大类单片集成电路,但本书界定范围仅为模拟 MMIC。在混合集成和单片集成电路中,本书侧重描述功率电路,对其它电路酌情介绍。在毫米波段,异质结器件包括单极晶体管、双极晶体管、以及 Ge, Si 异质结器件、真空微电子器件和量子限制器件(量子点、量子线、调谐隧穿二极管、调谐隧穿三极管、调谐隧穿场效应管)等,本书界定范围为高电子迁移率和真空场效应管。虽然有上述限制,但在设计原理、工艺技术等许多方面,