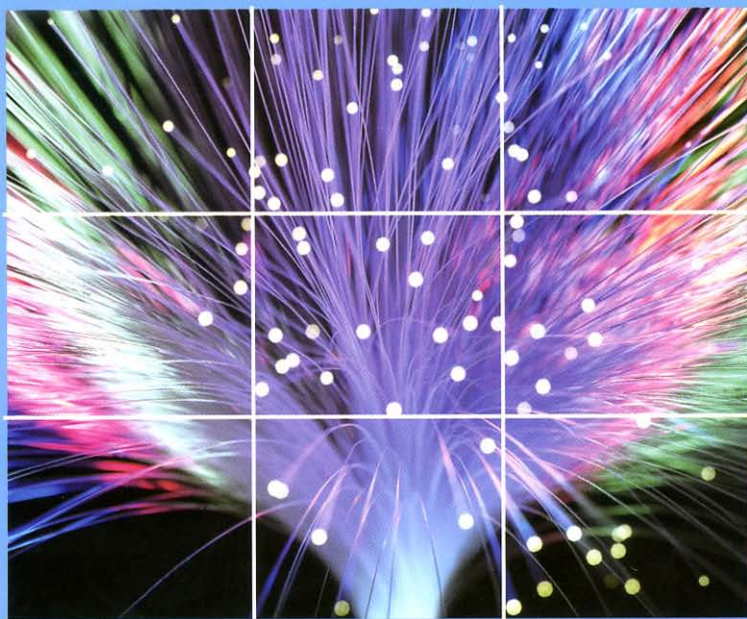


Novel RF/MW Power
Device Introduction

射频/微波 功率新型器件导论

黄 伟 李海鸥 于宗光 吴笑峰 首照宇 著

Novel RF/MW Power Device
Introduction



復旦大學出版社

射频 / 微波功率新型器件导论

黄 伟 李海鸥 于宗光 吴笑峰 首照宇 著

出版社

内容提要

本书把握新一代射频/微波功率器件技术路线与发展趋势,重点开展基于双层多晶硅新结构的射频/微波脉冲功率晶体管的研制及其硅化物材料热稳定性关键工艺的研究。

定性分析深槽结构的槽深、槽宽以及槽中填充物对器件 BC 结击穿电压的影响,提出了双深槽终端新结构,能有效提高器件 BC 结的反向击穿能力。利用步内建模法,创新地提出了基于器件的三维热电耦合模型,比器件的二维热电耦合模型更准确、更清晰地反映实测器件热电成像的结温分布。

摸索出在镍中分别以夹层方式掺入少量薄层金属 Pt, Mo, W, Zr, Ta 来提高镍硅化物热的稳定性,以降低器件发射极、基极的电阻值。运用吉布斯自由能理论给出了关于硅化物 NiSi 热稳定性得以改善的合理解释。研制了带保护环结构并由上述 5 种夹层金属形成的 NiSi/Si 肖特基硅器件。器件良好的 $I-V$ 电学特性表明,上述 5 种硅化物是令人满意的互连和接触材料。

新结构微波功率器件的电学、热学测试结果表明,该微波功率器件可覆盖全射频段,甚至扩展至微波 S 波段应用,并为开发硅基 LDMOS, AlGaIn/GaN HEMT 新一代微波功率器件奠定了良好的研究基础。

前 言

近 10 余年来,以 LTE 为代表的新一代移动通信和以博客、播客、C2C 电子商务等新应用形式的互联网融合趋势愈演愈烈,移动互联网因具有可大幅扩宽访问带宽并能兼容对数据业务的支持等综合优势已成为当今世界发展最快、市场潜力最大、前景最诱人的 IT 业务。智能移动终端已进入普通消费者生活,移动互联网也已成为人们获取信息、交流沟通和娱乐最重要的工具之一,截至 2012 年 9 月底,全球移动互联网用户已达 15 亿。

作为移动通信系统和手持通信终端的核心部件,长期以来射频功率放大器需要大量多频段、线性度好的各类射频/微波功率器件,而西方发达国家一直在此类核心器件研制、关键制造工艺技术以及应用等核心领域对我国进行禁运。为此,中国电子科技集团公司第五十八研究所的黄伟、于宗光,桂林电子科技大学的李海鸥、首照宇和湖南科技大学的吴笑峰等本专著作者联合攻关,从硅基双极型微波功率器件(Bipolar)设计与理论入手,并涉及硅基 RF-LDMOS 新器件、新一代氮化镓基微波功率器件。本书较为全面地阐述在开发射频/微波功率器件过程中需解决的共性关键技术。

囿于学识,本书错误和不当之处在所难免,殷切期望广大读者和同行提出宝贵的批评和建议。

作 者

2013 年 4 月

目 录

第一章 引言	(1)
§ 1.1 微波功率器件的研究背景	(1)
§ 1.2 硅双极微波功率器件的发展	(6)
§ 1.3 国内外研究现状	(10)
§ 1.4 本书内容来源与安排	(12)
第二章 双层多晶硅微波功率管的横向参数与纵向参数设计	(16)
§ 2.1 本章概要	(16)
§ 2.2 硅双极微波功率晶体管的工作原理及主要参数	(16)
§ 2.3 器件指标	(21)
§ 2.4 器件设计	(22)
§ 2.4.1 外延材料的选择	(22)
§ 2.4.2 器件纵向参数设计	(24)
§ 2.4.3 器件横向参数设计	(25)
§ 2.5 微波功率器件的版图设计	(28)
§ 2.5.1 器件版图的结构	(28)
§ 2.5.2 覆盖式与梳状版图结构图形优值比较	(36)
§ 2.5.3 光刻掩模版的编号、名称、次序及最小尺寸	(38)
§ 2.5.4 器件的测试结构	(39)
§ 2.6 本章小结	(39)

第三章	器件特性的模拟分析	(42)
§ 3.1	本章概要.....	(42)
§ 3.2	双层多晶硅微波功率管的电学特性模拟.....	(42)
§ 3.3	提升器件击穿电压的槽终端技术.....	(50)
§ 3.3.1	器件槽终端技术的发展.....	(52)
§ 3.3.2	槽深对击穿电压的影响.....	(54)
§ 3.3.3	槽宽对击穿电压的影响.....	(56)
§ 3.3.4	槽中填充物对击穿电压的影响.....	(59)
§ 3.3.5	深槽终端技术与其他终端技术的比较.....	(61)
§ 3.4	功率管多子胞技术.....	(62)
§ 3.4.1	器件的三维热电耦合模型.....	(64)
§ 3.4.2	器件的发射极布局.....	(69)
§ 3.4.3	结果的分析与讨论.....	(70)
§ 3.5	本章小结.....	(79)
第四章	镍硅化物薄膜的热稳定性及其应用研究	(81)
§ 4.1	本章摘要.....	(81)
§ 4.2	硅化物的发展过程.....	(82)
§ 4.3	NiSi 的热稳定性的研究.....	(88)
§ 4.4	掺 Pt, Mo, W, Zr 和 Ta 对 NiSi 薄膜热稳定性的改善.....	(92)
§ 4.4.1	掺 Pt 对 NiSi 薄膜热稳定性的改善.....	(92)
§ 4.4.2	掺 Mo 对 NiSi 薄膜热稳定性的改善.....	(98)
§ 4.4.3	掺 W 对 NiSi 薄膜热稳定性的改善.....	(101)
§ 4.4.4	掺 Zr 对 NiSi 薄膜热稳定性的改善.....	(107)
§ 4.4.5	掺 Ta 对 NiSi 薄膜热稳定性的改善.....	(113)
§ 4.5	镍硅化物热稳定性的理论研究.....	(118)
§ 4.6	Ni(M)Si/Si 肖特基器件的应用研究.....	(122)
§ 4.6.1	Ni(M)Si/Si 肖特基器件的设计.....	(123)
§ 4.6.2	肖特基器件的工艺流程.....	(125)
§ 4.6.3	NiSi/Si(Cap Ti)肖特基器件的	

电学特性	(126)
§ 4.6.4 Ni(Pt)Si/Si, Ni(Mo)Si/Si, Ni(W)Si/Si, Ni(Zr)Si/Si 和 Ni(Ta)Si/Si 器件的电学 特性研究	(128)
§ 4.7 NiSi 与 Ni(Pt)Si, Ni(Mo)Si, Ni(W)Si, Ni(Zr)Si 和 Ni(Ta)Si 热稳定性的比较	(138)
§ 4.8 本章小结	(140)
第五章 关键工艺技术的研究	(142)
§ 5.1 本章概要	(142)
§ 5.2 硅深槽隔离技术研究	(142)
§ 5.3 外基区的形成以及侧墙—发射极的形成	(147)
§ 5.3.1 外基区的形成	(147)
§ 5.3.2 基区侧墙的形成	(149)
§ 5.3.3 发射极的形成	(151)
§ 5.4 自对准钴硅化物引线技术	(155)
§ 5.5 本章小结	(156)
第六章 器件制造流程	(157)
§ 6.1 本章概要	(157)
§ 6.2 器件的结构特点和工艺特点	(157)
§ 6.3 器件的工艺流程	(157)
§ 6.4 工艺流片中的注意事项	(162)
§ 6.5 本章小结	(164)
第七章 微波功率器件的测试与分析	(165)
§ 7.1 本章概要	(165)
§ 7.2 器件的直流参数测试	(165)
§ 7.3 深槽击穿特性的合格率测试	(171)
§ 7.4 器件的热性能测试	(172)
§ 7.5 器件的微波特性测试结果	(176)

§ 7.6	本章小结	(177)
第八章	射频/微波功率器件的最新发展	(178)
§ 8.1	本章概要	(178)
§ 8.2	微波功率器件的主要领域	(178)
§ 8.2.1	无线通信领域	(178)
§ 8.2.2	军用电子系统和雷达	(180)
§ 8.2.3	医疗电子	(180)
§ 8.3	RF-LDMOS 技术的发展	(180)
§ 8.3.1	RF-LDMOS 的关键参数	(183)
§ 8.3.2	RF-LDMOS 的新结构器件	(184)
§ 8.4	AlGaIn/GaN HEMT 毫米波技术	(189)
§ 8.4.1	AlGaIn/GaN HEMT 高电子迁移率器件 毫米波功率技术的起源	(189)
§ 8.4.2	AlGaIn/GaN HEMT 高电子迁移率器件 毫米波功率技术的发展	(191)
§ 8.5	本章小结	(195)
	参考文献	(196)

第一章

引言

§ 1.1 微波功率器件的研究背景

未来的战争必将是电子战争,是先进技术较量的战争。作为一种防御手段,远距离探测雷达主要用于军事领域,起着警戒、搜索、跟踪敌机的作用。随着雷达技术的发展,雷达也可作为进攻的辅助手段,如炮瞄、制导、引爆等,提高了武器的效能。极强功率的雷达可作为微波辐射武器直接杀伤敌方人员和摧毁电子装备,使战争进入“电子兵器”时代。雷达发射机用的微波功率器件是雷达最重要的部件之一,它深刻地影响着雷达的性能。同时,雷达技术的发展引导着微波功率器件的发展方向^[1]。随着现代相控阵雷达技术的发展,微波功率器件也从真空电子器件向固体电子器件转变。因固体微波功率电子器件具有性能优越、体积小、重量轻、输出功率大、可靠性高等特点,进而能显著提高雷达系统的效率和可靠性、灵活性而被广泛地使用。此外,微波功率器件及其电路在军事方面还广泛用于空间防御、通信、高速电子计算机和数据处理、精确雷达、电子对抗、智能化系统及火控装备等军事装备中。因此,微波功率器件的发展水平在先进的国防装备中占有重要的地位,以致成为突破或制约尖端技术的关键。

另一方面,近些年来,随着第三代移动通信技术(3rd-generation, 3G)的普及,第四代移动通信技术(4th-generation, 4G)和物联网

等技术快速增长,人们对通信质量和业务范围的要求也越来越高,不仅希望能在不同地方进行高质量通话,而且还要求能开展数字、传真、图像、智能识别等非通话业务服务。因此,上述需求推动着移动通信技术朝着通信频率不断提高、通信带宽逐渐增加的方向快速发展,而微波/射频功率器件是移动通信系统基站和手机 T/R(transmitter/receiver) 组件功率放大器的核心元器件,直接影响通信电子系统的工作状态。

功率微波固体电子器件主要包括 3 种类型:以双极结型晶体管(BJT)、横向扩散金属氧化物半导体(LDMOS)为主流产品的硅(Si)基微波功率器件^[2, 3, 4];采用砷化镓(GaAs)、锗化硅(SiGe)异质结技术的异质结双极晶体管(HBT)微波功率器件^[5, 6];尚处于起步阶段的基于宽禁带半导体碳化硅(SiC)、氮化镓(GaN)材料的功率器件^[7]。可以说,它们既存在发展的机遇,又面临着挑战。

长期以来,硅双极器件一直是制造固态微波功率器件的主流技术之一^[2, 3, 4],其主要原因能够归纳为以下两点:第一,硅材料具有成本低廉、禁带宽度较宽、良好的热导率等优良特性,因此一直被认为是合适制造功率器件的半导体材料之一。第二,双极器件具有响应时间快、驱动能力强、电流增益高等优点,因此这种器件结构很适合制造微波大功率器件。据文献报道,目前在频率低于 3 GHz 的武器装备中,大量使用的微波功率器件就是利用双极结构研制的。但随着微波毫米波技术的迅速发展,硅双极微波功率器件的缺陷逐渐暴露出来。首先,硅材料的低电阻率产生了很大的 EB 电容,给器件附加了较大的寄生成分,严重恶化了器件的频率特性。此外,硅材料的功率密度特性较低,仅为 1 W/mm,这限制了硅基双极微波器件的功率输出,即便是采用了加长发射极周长的办法也并不能有效提高器件的功率密度,相反又带来输入阻抗过低、输出容抗过大的问题,这给器件内匹配实现又提出了苛刻的要求。因此,随着器件工作频率的升高,该器件表现出功率增益和效率退化的迹象。令人可喜的是,计算机辅助设计技术和半导体集成电路工艺技术的进步,加之廉价高质量的硅材料及成熟先进的硅工艺技术为大幅度提高硅微波功率器件的性能创造了良好的条件。特别是自从 20 世纪

80 年代中期开始至 90 年代以来,硅微波功率双极晶体管的发展已进入全面发展的时期,这为在不同频段的相控雷达系统中采用成熟的硅微波功率晶体管提供了便利的条件,有文献报道了这种硅器件已应用到 S 波段高端(3.4 GHz) 的雷达系统和 C 波段低端(4.2 GHz) 的导弹制导系统中^[8]。

从 20 世纪 90 年代初至今 10 多年以来,硅微波功率 LDMOS 功率器件已经广泛应用于各种固体功率系列,如宽带功率放大器、信号放大器、高速开关、特高频(UHF) 、TV 发射机和全球移动通讯系统(GSM) 、个人通讯服务(PCS) 地面站等。硅微波功率 LDMOS 之所以备受青睐、获得如此广泛的应用,主要是因为硅微波功率 LDMOS 与硅微波功率双极晶体管(BJT) 相比具有如下优点: 多子器件,无少子存储效应,因此器件的开关速度快; 具有漏极电流负温度系数特性,能提高器件的热可靠性,有利于大功率微波器件的集成; 输入输出阻抗高,匹配电路结构简单; 具有优良的线性性能和较宽的动态范围; 具有良好的射频性能和抗烧毁能力。正因为这些优点,随着优化设计和材料及工艺技术的进步,国内外对硅微波功率 LDMOS 的研究进展突飞猛进。文献报道,在 2002 年,Ericsson 与瑞典的 Uppsala 大学采用 0.35 μm 工艺技术联合研制出 3.2 GHz、1 W 的 LDMOS。尽管到目前为止,频率在 100 MHz~2 GHz、输出功率在 5~240 W 的 LDMOS 产品已在市场上广泛应用^[9],但事实上,为了使硅微波功率 LDMOS 器件能在大电压状态下工作,通常将器件的漂移区长度加长,这造成载流子漂移时间过长,严重影响了器件的频率特性。此外,栅电容过大,产生较大的输入阻抗,这也自然成为制约微波功率器件 LDMOS 继续提高工作频率的瓶颈。直到如今,还未出现将这种器件的工作频率提高到 3 GHz 以上的有效方法^[10]。

与硅基微波功率器件相比,用砷化镓材料研制的金属-半导体场效应晶体管(MESFET) ,以及用 AlGaAs/GaAs 研制的异质结构的高电子迁移率微波功率器件(HEMT) 可以说是一项新技术^[11]。正是充分利用了比硅材料绝缘性能更好、电子迁移率又比硅材料高 5~7 倍的砷化镓材料,器件结构相对简单的金属-半导体接触势垒

场效应晶体管(MESFET)和高电子迁移率晶体管器件自然很容易在高于3 GHz的微波波段获得增益大、效率高和噪声小等电学特性。因此,由单管结构制造的功率器件成为制造微波功率器件的另一项先进技术。但研究发现,以下几个因素限制了它在微波大功率器件领域的发展。首先,材料生长昂贵,且成品率低,因此制造出大栅宽的微波功率器件的可靠性低。其次,砷化镓材料的热导率只有硅材料的热导率的十分之一,因此器件散热成为影响器件性能的一个严重问题。通常这种器件被应用在输出功率较低的便携式终端中。最后,砷化镓制造工艺很难与硅工艺集成,因此限制了它的广泛使用。随后,人们在成熟的硅工艺基础上开发锗化硅工艺,它主要采用外延生长的方法获得比器件发射极禁带宽度更窄的锗化硅基区,正是器件的这个异质结结构大大提升了功率器件的特征频率 f_T 、最高振荡频率 $f_{\max}$ ^[12]。但事实上,因为锗化硅器件的基区结构禁带宽度较窄,不能承受器件大偏压的工作电压,尤其器件处于反向偏置时,很容易发生击穿,器件的功率输出自然较小。此外,器件工作电流的负温度系数造成电流在器件各处分布不均,严重时会出现电流崩塌的现象^[13]。因此,锗化硅技术和砷化镓技术一样,研制的微波功率器件仅用于输出功率小的通信终端产品,例如手机、小灵通等通信终端。

近些年,宽禁带半导体材料(GaN)以其良好的物理化学和电学性能成为继第一代元素半导体硅和第二代化合物半导体砷化镓、磷化铟(InP)等之后迅速发展起来的第三代半导体材料。与目前绝大多数的半导体材料相比,GaN具有独特的优势:禁带宽度更宽、饱和漂移速度更快、临界击穿电场和热导率更高。这充分表明,GaN基的器件功率密度在理论上可以比Si基、GaAs基器件高10倍以上,因此GaN基宽带隙半导体在微波大功率制造中具有巨大的优势,被认为是发展高频、高功率、高温、抗辐射、抗腐蚀的新一代电子器件的最优选半导体体系,被誉为新一代的“军事功率半导体”。迄今国际上 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 宽禁带半导体异质结构材料、物理和器件的研究已取得令人鼓舞的进展。目前,最新的文献报道了在SiC衬底上制造的异质结构 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 功率器件工作在Ku频段下,

约为 30 GHz,输出功率可达到 2.3 W。尽管国际上 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结构电子材料和器件研究已达到很高水平,但在面向不同应用场合的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ HEMT 微波功率器件产品实用化方面还存在某些困难,主要原因包括:材料生长设备以及加工设备昂贵;MOCVD 生长的 GaN 材料制造的不均匀性严重影响大功率器件的性能;器件的物理机制仍然不清楚,尤其是对器件电流崩塌的理解,对 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结构的极化效应、表面局域能态及其起源、缺陷及缺陷控制等方面都需深入研究^[14];仍需突破 GaN 功率器件等关键制造技术,这包括器件的欧姆接触技术、退火技术以及刻蚀技术,因此高成本的 AlGaIn/GaN 微波器件完全取代硅基双极、LDMOS 微波功率管,并面向民用通信市场和满足军事装备的实用化要求还需经历一个较长的过程。

由此可见,工作在微波至毫米波器件及电路中的硅基、砷化镓基、磷化铟基和氮化镓基等军用微电子器件中,砷化镓基、磷化铟基在微波频率高端占有优势;碳化硅、氮化镓在高温工作领域有一席之地;而在高频和微波频率低端(5 GHz 以下),在成本、微细加工技术、工作电压、工作结温、输出功率等方面硅器件占有优势,有着相当大的市场。

军用电子迅猛发展带动了微波功率晶体管及其电路在民用方面的应用,主要集中在无线通信、个人通信网、全球定位系统、直播卫星接收、小孔径终端卫星系统和自动防撞系统中。根据西方有关机构预测,如果仅考虑无线通讯应用,市场对可在 30 V 或更高电压下工作的微波功率放大器的需求量从 2001 年到 2009 年就以每年约 100% 的速度递增,2009 年总销售额达到 4 亿美元。在移动通讯领域中,目前手机的信号输出部件大量使用的是砷化镓场效应管(GaAs FET),但其工艺复杂、成本高。Ⅲ族氮化物高温微波功率器件在民用市场具有非常大的潜力,主要领域包括移动通信、航空航天、汽车防撞雷达、石油钻探等,但整套的氮化镓技术事实上并不成熟。而基于硅的锗硅技术的出现,不但提高了硅双极(Si Bipolar)器件的性能,与此同时也拓宽了 Si Bipolar 器件的应用领域。随着锗硅技术的不断发展成熟,锗硅异质结双极晶体管(SiGe HBT)以其

工艺简单(与普通硅工艺兼容)、廉价等优点正逐步介入这一领域,IBM 公司、惠普公司、Daimler Chrysler 公司、SiGe 公司(一家专门从事锗硅器件电路研究生产的加拿大公司)等众多半导体公司已陆续推出了相应的锗硅通讯产品,可以预见,以硅为主的半导体技术在今后有更为广阔的前景^[15]。

§ 1.2 硅双极微波功率器件的发展

自从 1947 年肖克莱(William Bradford Shockley)发明了第一只晶体管以来,硅双极技术的发展以最初非自对准双极平面晶体管为起点,依次经历了单层多晶硅晶体管、双层多晶硅晶体管以及锗硅异质结晶体管这 3 个重要阶段。可以说,以多晶硅发射极技术和锗硅技术为标志的这 3 个阶段是集成电路发展史上的一个重要里程碑,硅双极集成电路技术因此产生了一个新的飞跃,发展到一个新的高度^[16, 17, 18, 19]。

1. 关于多晶硅发射极晶体管(PET)的研究模型

众所周知,对于传统晶体管来说,按比例缩小会带来电流增益的下降。为了保持合适的电流增益,往往要求基区是低掺杂的,这样就会增加基区电阻,但容易导致基区穿通。不难看出,先进的双极器件存在着电流增益和基区掺杂之间的折衷。利用多晶硅发射极接触可以提高电流增益,使得双极器件能够在不降低发射极-集电极穿通电压和不损失电流增益的情况下,实现器件的纵向按比例缩小。一个高性能的双极器件在纵向按比例缩小时,横向也需要按比例缩小,只有这样才能使器件性能得到明显的改善。自对准技术和深槽隔离技术的诞生又实现了器件横向尺寸的等比例缩小,以减小器件相应的寄生电容及寄生电阻,从而进一步提高器件的工作速度和缩短器件的响应时间。

对于多晶硅发射极晶体管,其电流增益改进的机理一直是人们关注的课题。科研人员经过长期的深入分析研究,提出了多种物理模型以解释多晶硅发射极晶体管的物理机制,并在不少文献报道了

有关这方面的研究成果。概括起来共有以下 4 种理论模型:

(1) 界面薄氧化层隧穿模型(SIS)。De Graaf 和 De Groot 认为位于多晶硅-单晶硅界面处的薄氧化层造成界面处的能带弯曲,这对空穴的输运起到阻碍作用,因此降低了多晶硅发射极晶体管的基极电流和提升了器件的电流增益。

(2) 载流子输运障碍模型。这个模型以 Ning 和 Isaac(NI)的“两区”模型为代表,认为在 n^+ 型多晶硅中少子空穴的扩散系数 D_p 比 n 型单晶硅中的 D_p 要小约 20 倍,这表明基极电流的大小主要由空穴在 n^+ 多晶硅中的输运机制决定,因此器件有较小的基极电流和较高的电流增益。

(3) 界面层杂质分凝和热离子发射模型。该模型是由 C.C. Ng 和 E.S. Yang 提出的。他们认为,杂质在多晶/单晶硅界面的分凝对空穴的输运起到一个势垒的作用,使得基极电流减小。他们同时还指出,界面处的基极电流以热离子发射方式存在,它不同于单晶硅中以漂移扩散机制产生的空穴电流。因为这个模型没有考虑多晶硅中的低迁移率现象,所以它只是从一个侧面反映多晶硅发射极晶体管电流增益增强的机理。

(4) 考虑以上两方面因素的综合模型。Eltoukhy 和 Roulston 提出的这个综合模型能够解释单晶和多晶之间有界面氧化层的多晶硅接触双极晶体管具有较高的电流增益的原因。此外,该模型还阐明了在不同区域内的少子复合效应以及通过界面层的隧道机制,同时评估了每个机制在器件工作中所起的作用。

总的来说,上述模型(1)、(2)、(3)都是在主要考虑了单一物理效应基础上建立起来的,只能解释特殊的实验现象,模型过于简化。模型(4)虽然包括了较多的物理效应,但它们主要是数值模型,其结果比较复杂,不宜在工程中推广应用。随后 Suzuki 提出了综合解析模型,得出了电流增益和基极电流的解析表达式,然而这个模型仍存在着严重不足。第一,模型过于数学化,它没有给出清晰准确的物理含义。第二,模型中没有包括在多晶硅发射极中空穴输运的核心机制,未能体现出单晶硅/多晶硅界面的物理效果,因此它未能完全反映出多晶硅发射极晶体管与常规金属发射极接触晶

极管(MET)最大的区别。马平西等人提出了一种包括较多物理效应的多晶硅发射极晶体管的综合解析模型,它与 Eltoukhy 和 Roulston 共同提出的综合模型(4)一样能解释观察到的重要物理现象,但其表达式物理意义清晰,适用于工程需要^[20, 21]。在马平西等人的模型中,不仅囊括了少子空穴向多晶硅中的注入和少子空穴在单晶发射区中的扩散这两个基本物理效应,还重点考虑了与多晶硅发射极晶体管电学特性密切相关的两种效应:由杂质在多晶硅/单晶硅界面分凝引起的势垒效应和少子在界面氧化层左边的界面态上的复合机制,同时将物理参数分为与多晶硅/单晶硅界面有关的界面物理参数和与纵向结构有关的参数。与实验结果对比分析,理论计算的器件性能和器件的实际电学参数能较好地吻合。

2. 微波脉冲大功率晶体管的研制和生产

微波脉冲大功率晶体管的研制和生产的难度是国内外器件研究者所公认的,这种难度包括多个方面,它实际上集中反映了微波功率管的性能设计、微电子加工、微带电路和管壳封装的最新技术水平:首先,是尺寸小于 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的微电子工艺加工技术;其次,由于器件的大功率输出,要求在管内进行内匹配微波功率合成,并要解决好大功率器件的散热和金属陶瓷的全密封等难点;此外,一个实用化的脉冲器件还必须具有良好的抗烧毁能力和长期的可靠性,亦即器件必须有良好的热设计和有效的镇流结构。

传统的硅双极微波大功率晶体管的制造一直延袭常规的非自对准平面双极晶体管结构,但在这种常规平面结构中,存在以下几个缺点:发射极与发射区、基极电极与基区都是直接接触;基极和发射极的隔离仍然是完全通过光刻图形来实现的。这实际上无形增加了器件的面积,增大了寄生的基极电阻 r_b 和集电极电容 C_c ,微波功率器件的频率特性因此被退化,器件单位面积的功率密度也被降低,从而限制了器件的微波功率输出进一步提升。为此,在当时的制造工艺条件下,迫不得已采用了覆盖结构的版图设计,以压缩器件面积为目的来提高功率器件的功率输出,但事实上,这种方法并不理想,反而使得基极电阻变得更大,微波功率器件的输出功率更低。

3. T型多晶硅微波功率管

为解决常规的平面双极微波功率晶体管结构存在的问题, Sunohara Y.等人首次把多晶硅技术和自对准技术相结合,率先设计出梳状结构的T型多晶硅微波功率管^[22]。T型结构多晶硅微波功率管具有以下优点:

(1) 掺杂浓度不同的多晶硅存在刻蚀速率的差异,通过各向异性选择刻蚀获得T形多晶硅发射极结构,这保证能获得很窄的发射极与基极的间距(约 $0.5\text{ }\mu\text{m}$)。

(2) 利用多晶硅发射极结构的特点,开发出波功率器件的二次镇流技术,器件的热可靠性得到明显改善。此外,该结构的优点还有在减小金属引线上的电流密度的同时,能保证器件获得良好的台阶覆盖。

(3) 通过垂直蒸发自对准地实现了基极和发射极的金属接触,具有很高的周长面积比。

与常规的非自对准平面双极晶体管相比,利用自对准技术和发射极多晶硅制造出来的T形结构多晶硅微波功率管,不但能将芯片面积缩小至前者的二分之一,而且能够明显增大器件的电流增益。因此T型结构微波功率管能够获得较好的频率和功率特性。但是T型结构的微波功率管存在两个问题。实验结果表明,当发射极条数增加时,由于难以准确控制自对准地垂直蒸发形成基极和发射极的金属接触,很容易造成器件出现短路现象,因此器件的可靠性大打折扣。其次,由于基极引线开在有源区中,器件的非本征基区面积较大,这是不利于器件获得更大功率输出的另一个重要原因。

4. 双层多晶硅结构微波功率管

由于单层多晶硅自对准结构在微波功率器件的尺寸进一步缩小时受到光刻水平的限制,设计者们转而利用目前先进的双层多晶硅自对准技术来研制微波功率器件,即用介质层把基区电极与发射极电极隔离起来。目前,文献报道了在手机芯片的T/R组件发射模块中,采用双层多晶硅器件单管结构实现了功率输出约为 1 W 左右的微波功率器件^[23]。概括地说,双层多晶硅结构微波功率管具有以下优点: