

博士后文库
中国博士后科学基金资助出版

微波氮化镓功率器件等效 电路建模理论与技术

徐跃杭 徐锐敏 李言荣 著



科学出版社



博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

微波氮化镓功率器件等效 电路建模理论与技术

徐跃杭 徐锐敏 李言荣 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书针对微波 GaN HEMT 功率器件的等效电路建模关键技术展开深入研究,特别是器件的热电效应、高低温特性、陷阱效应、谐波特性和高频寄生参数效应,以及工艺参数误差变化特性等目前有待解决的问题。本书从 GaN HEMT 器件工作机理出发,系统地介绍微波 GaN HEMT 功率器件发展现状和趋势,以及小信号模型、大信号热电模型、大信号缩放模型、统计模型和表面势模型等面向工程化应用的建模技术,并将该模型应用于大栅宽器件功率电路的输出特性预测与工艺参数分析。

本书可作为电子科学与技术专业从事微波电路技术、微电子技术相关方向的研究生专业课程教材,以及工程师的参考书籍。

图书在版编目(CIP)数据

微波氮化镓功率器件等效电路建模理论与技术/徐跃杭,徐锐敏,李言荣著. —北京:科学出版社,2017

(博士后文库)

ISBN 978-7-03-052036-4

I. ①微… II. ①徐… ②徐… ③李… III. ①氮化镓-功率半导体器件-等效电路-系统建模-研究 IV. ①TN303

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 048195 号

责任编辑:鲁永芳 赵彦超/责任校对:张凤琴

责任印制:肖 兴/封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 3 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017 年 3 月第一次印刷 印张:20 3/4 彩插:6

字数:401 000

定价:138.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《博士后文库》序言

1985年，在李政道先生的倡议和邓小平同志的亲自关怀下，我国建立了博士后制度，同时设立了博士后科学基金。30多年来，在党和国家的高度重视下，在社会各方面的关心和支持下，博士后制度为我国培养了一大批青年高层次创新人才。在这一过程中，博士后科学基金发挥了不可替代的独特作用。

博士后科学基金是中国特色博士后制度的重要组成部分，专门用于资助博士后研究人员开展创新探索。博士后科学基金的资助，对正处于独立科研生涯起步阶段的博士后研究人员来说，适逢其时，有利于培养他们独立的科研人格、在选题方面的竞争意识以及负责的精神，是他们独立从事科研工作的“第一桶金”。尽管博士后科学基金资助金额不大，但对博士后青年创新人才的培养和激励作用不可估量。四两拨千斤，博士后科学基金有效地推动了博士后研究人员迅速成长为高水平的研究人才，“小基金发挥了大作用”。

在博士后科学基金的资助下，博士后研究人员的优秀学术成果不断涌现。2013年，为提高博士后科学基金的资助效益，中国博士后科学基金会联合科学出版社开展了博士后优秀学术专著出版资助工作，通过专家评审遴选出优秀的博士后学术著作，收入《博士后文库》，由博士后科学基金资助、科学出版社出版。我们希望，借此打造专属于博士后学术创新的旗舰图书品牌，激励博士后研究人员潜心科研，扎实治学，提升博士后优秀学术成果的社会影响力。

2015年，国务院办公厅印发了《关于改革完善博士后制度的意见》（国办发〔2015〕87号），将“实施自然科学、人文社会科学优秀博士后论著出版支持计划”作为“十三五”期间博士后工作的重要内容和提升博士后研究人员培养质量的重要手段，这更加凸显了出版资助工作的意义。我相信，我们提供的这个出版资助平台将对博士后研究人员激发创新智慧、凝聚创新力量发挥独特的作用，促使博士后研究人员的创新成果更好地服务于创新驱动发展战略和创新型国家的建设。

祝愿广大博士后研究人员在博士后科学基金的资助下早日成长为栋梁之才，为实现中华民族伟大复兴的中国梦做出更大的贡献。



中国博士后科学基金会理事长

前 言

长期以来,国内由于器件工艺和微波测试设备的限制,微波半导体器件建模理论及其技术进展一直落后于国外大学、公司和研究机构。微波半导体器件模型不仅可用于协助指导器件结构参数和工艺参数优化,更是电路设计必备工具。精确的微波器件大信号模型对提高器件性能、缩短电路研发周期、提高设计成品率、降低研发成本以及推动其大规模系统集成与应用等方面具有重要意义。本书以国产微波氮化镓功率器件为出发点,重点开展了面向工程化应用的等效电路建模理论与技术研究,旨在为我国目前以及未来微波化合物半导体器件工艺线和微波核心电子器件发展提供重要的建模理论基础和电路设计工具。

宽禁带半导体器件——氮化镓高电子迁移率晶体管 (GaN HEMT) 以其高频、高功率密度、高功率效率等特性优势,成为近年来国内外微波半导体器件研究的热点。由于 GaN 器件在材料制备、器件工艺和工作机理等方面均与传统 Si、GaAs 等半导体材料场效应晶体管不同,以及典型的 GaN 器件均在高压、高功率密度下工作等因素,场效应晶体管模型及其建模方法难以准确表征微波 GaN 器件的一些特殊物理特性,如陷阱、自热、功率饱和、谐波和环境温度影响等特性。随着 GaN 器件特征尺寸进一步缩小,工作频率和输出功率的提升,以及对电路设计成品率的进一步需求,开展微波 GaN 建模研究对 GaN 器件和电路的发展有着重要意义。因此,本书针对国产微波 GaN HEMT 器件工艺线,围绕器件工作机理,采用目前工程中应用最为广泛的等效电路建模方法,系统地研究了微波 GaN HEMT 器件建模理论、方法和技术,并对未来发展方向进行了展望。

本书是作者多年来在微波宽禁带半导体器件设计与建模科研工作的总结,内容来自于作者与中国电子科技集团公司第五十五研究所、中国电子科技集团公司第十三研究所等单位联合发表在国际重要期刊和会议的文章。相关研究工作长期以来受到中国电子科技集团顾问赵正平研究员、王红高工、石志宏研究员、丁熠,中国电子科技集团公司第五十五研究所所长高涛研究员、首席科学家张斌研究员、首席科学家陈堂胜研究员、柏松研究员、余旭明博士、任春江博士、郑惟彬博士、周建军博士、钟世昌、汪珍胜、陆海燕等,中国电子科技集团公司第十三研究所蔡树军研究员、王强所长、吴洪江研究员、戴伟处长、胡志富主任、杜鹏博博士、张志国博士、李静强等给予的大力支持和帮助,本书的编写由电子科技大学微波毫米波电路与系统实验室成员延波研究员等,以及汪昌思博士、闻彰博士、赵晓冬博士、

陈志凯博士、武庆智博士、陈亚培博士、贾勇昊博士、孙环硕士等协助编写，在此一并表示衷心的感谢！最后，感谢我的妻子吴韵秋博士长期以来对我工作的理解和支持。

由于微波微纳半导体器件及其建模是一门发展迅速的新技术，加上作者水平有限，本书难免有疏漏和不妥之处，敬请读者批评指正。

徐跃杭

2016年10月18日

目 录

《博士后文库》序言

前言

第 1 章 引言	1
1.1 背景	1
1.2 微波宽禁带半导体器件进展	3
1.3 微波宽禁带半导体器件建模进展	16
1.4 本书内容	24
第 2 章 微波氮化镓器件及其建模理论	26
2.1 器件结构	26
2.2 GaN 材料特性	28
2.2.1 GaN 外延生长技术简介	30
2.2.2 GaN HEMT 材料生长关键技术	30
2.3 GaN HEMT 器件工艺	38
2.3.1 GaN HEMT 源漏欧姆接触	38
2.3.2 GaN HEMT 器件钝化工艺优化	41
2.3.3 场板技术	42
2.4 GaN HEMT 工作原理	48
2.5 GaN HEMT 器件特性	53
2.5.1 自热效应	54
2.5.2 陷阱效应	63
2.6 器件建模理论	66
2.6.1 模型分类及建模方法	66
2.6.2 模型准确性	71
2.7 本章小结	73
第 3 章 微波 GaN 器件小信号等效电路模型	74
3.1 引言	74
3.2 19 元件微波 GaN 器件小信号等效电路模型	74
3.2.1 模型拓扑	74
3.2.2 模型参数提取	75
3.2.3 模型验证	88

3.3	110GHz 超宽带 GaN HEMT 小信号模型	92
3.3.1	基于 TRL 方法的晶体管去嵌	92
3.3.2	超宽带小信号模型拓扑及其参数提取	96
3.4	本章小结	102
第 4 章	微波 GaN 器件大信号模型研究	103
4.1	环境温度相关大信号模型	103
4.1.1	微波 GaN HEMT 器件热传递理论及其建模技术	103
4.1.2	高低温 GaN HEMT 大信号模型拓扑及建模流程	110
4.1.3	温度相关非线性漏源电流 I_{ds} 模型	113
4.1.4	高低温热仿真分析	114
4.1.5	非线性栅电容模型	120
4.1.6	非线性栅电流模型	121
4.1.7	微波 GaN HEMT 热电大信号模型验证	121
4.2	非线性热阻及其建模研究	125
4.2.1	模型拓扑及建模流程	125
4.2.2	改进的漏源电流 I_{ds} 模型	126
4.2.3	自热效应研究	127
4.2.4	陷阱效应研究	129
4.2.5	大信号模型验证	132
4.3	微波场板 GaN HEMT 大信号模型分析	135
4.4	温度相关源/漏接入阻抗对微波 GaN 器件特性影响	138
4.4.1	温度相关 R_s 和 R_d 提取	138
4.4.2	GaN HEMT 器件热电网参数提取	142
4.5	典型脉冲条件下热阻变化规律的研究	155
4.5.1	GaN HEMT 器件脉冲工作状态	155
4.5.2	脉冲偏置条件下热阻特性	157
4.6	本章小结	161
第 5 章	GaN HEMT 大信号可缩放模型及其应用	162
5.1	不同尺寸器件的热阻特性	164
5.2	大信号热电缩放模型	167
5.3	大信号模型缩放规则	170
5.4	大信号缩放模型验证	172
5.4.1	直流 $I-V$ 特性验证	172
5.4.2	小信号特性验证	175
5.4.3	大信号特性验证	176

5.5	大信号可缩放模型在功率放大电路中的应用	181
5.5.1	C 波段高功率 GaN HEMT 功率放大器 MMIC 设计	181
5.5.2	基于谐波控制技术的微波 GaN 内匹配功率管	192
5.6	本章小结	201
第 6 章	统计模型	202
6.1	高效率模型参数提取技术	206
6.1.1	小信号模型高效率参数提取	206
6.1.2	大信号模型高效参数提取	210
6.2	基于小信号等效电路模型工艺统计分析	219
6.3	统计模型	228
6.3.1	小信号统计模型	228
6.3.2	全参数大信号统计模型	239
6.3.3	统计模型在功率放大器中的应用	239
6.3.4	基于响应曲面法的统计模型建模方法	247
6.4	本章小结	251
第 7 章	物理基大信号等效电路模型	252
7.1	表面势模型发展动态	253
7.2	基于表面势原理的等效电路建模	260
7.3	基于表面势模型工艺参数统计分析	272
7.3.1	工艺参数优化	272
7.3.2	工艺参数分析	275
7.4	新兴物理基等效电路模型	281
7.4.1	区域划分模型	281
7.4.2	基于虚拟源概念的电荷控制模型	289
7.5	本章小结	295
第 8 章	结束语	296
	参考文献	298
	编后记	317
	彩图	

第1章 引言

1.1 背景

电子信息技术已成为现代社会国民经济的支柱，而微电子技术则是电子信息技术的重要基础。20世纪60年代以来，锗(Ge)、硅(Si)等第一代元素半导体及其集成电路引发的现代产业革命，极大地推动了现代社会电子信息技术的发展。继Ge、Si之后，砷化镓(GaAs)等第二代化合物半导体材料由于具有更高的电子迁移率、容易形成异质结等优点，其器件和集成电路在微波毫米波通信和军用电子装备等领域发挥着重要作用。然而，由于受其材料本身特性的制约，在高频率、大功率微波功率器件领域，基于第一代和第二代半导体材料的传统器件的发展已逐渐逼近其性能极限。近年来随着武器装备更新换代速度的加快，对微波功率器件的输出功率、效率、工作带宽等特性提出了更高的要求。此外，下一代无线通信(5G)技术及其无线基站需要工作在更高频率、覆盖更宽的频带，并具有更高的功率转换效率。针对这些新兴的需求，亟需开发具有更高性能的微波功率器件^[1]。

20世纪末期，宽禁带(WBG)半导体材料(碳化硅(SiC)和氮化镓(GaN))以其较大的禁带宽度、高饱和迁移速度、高击穿电压、抗辐照等特点，成为了高频大功率器件和系统的研究热点^[2]，在民用通信、物联网、石油勘探、航空、航天、雷达系统以及其他国防领域中有着广泛的应用前景^[3,4]。目前微波宽禁带半导体器件主要有两类：SiC器件和GaN器件。在早期的研究中由于金属场效应晶体管(MESFET)工艺简单，主要研究成果集中在SiC MESET(金属半导体场效应晶体管)器件^[5]，在输出功率方面超过Si基器件。然而由于其成本比Si器件LDMOS(横向扩散金属氧化物半导体)高，因此随着异质结工艺的突破，微波氮化镓高电子迁移率晶体管(GaN HEMT)获得了迅猛发展。图1-1给出了几种典型半导体材料在功率器件方面的应用领域。可以看出，与Si、GaAs等器件相比，基于GaN的功率器件具有更高的射频(RF)功率输出能力。GaN微波功率器件的性能优势不仅表现在GaN材料本身的性能优势，更重要的是GaN与AlGaIn构成的AlGaIn/GaN异质结构可以产生二维电子气(2DEG)，显著提升了材料中电子的输运特性，典型AlGaIn/GaN异质结的2DEG迁移率可达到 $2000\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 以上。另外AlGaIn/GaN异质结还可以生长在具有高导热性能的半绝缘SiC衬底上，进一步改善了材料的散热特性。基于半绝缘SiC衬底的AlGaIn/GaN HEMT综合了异质结的高输运特性和SiC衬

底的高导热性两方面的优势,奠定了 GaN HEMT 成为新一代固态微波器件主导器件结构的基础 [6]。

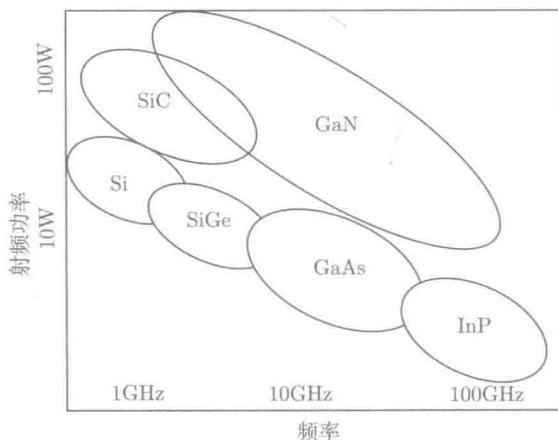


图 1-1 几种典型半导体材料的应用领域

近年来,世界各国针对 GaN 材料及器件开展了大量研发工作,并取得了一系列成果 (如图 1-2 所示)[6]。美国国防部高级研究计划局 (DARPA) 发起的射频宽禁带半导体技术 (WBGs-RF) 项目,已能生产出工作频率高于 40GHz 的具有高性能、高可靠性的 GaN HEMT 器件。而且 DARPA 已发起下一阶段的氮化物器件的研究,名为 nitride electronic next generation technology(NEXT),目标是使 GaN HEMT 器件的截止频率 f_T 达到 500GHz, f_{max} 达到 550GHz, Johnson 品质因素达到 5THz·V, 功率提高 3 倍,并用其制作大规模集成电路[7]。此外,欧洲的

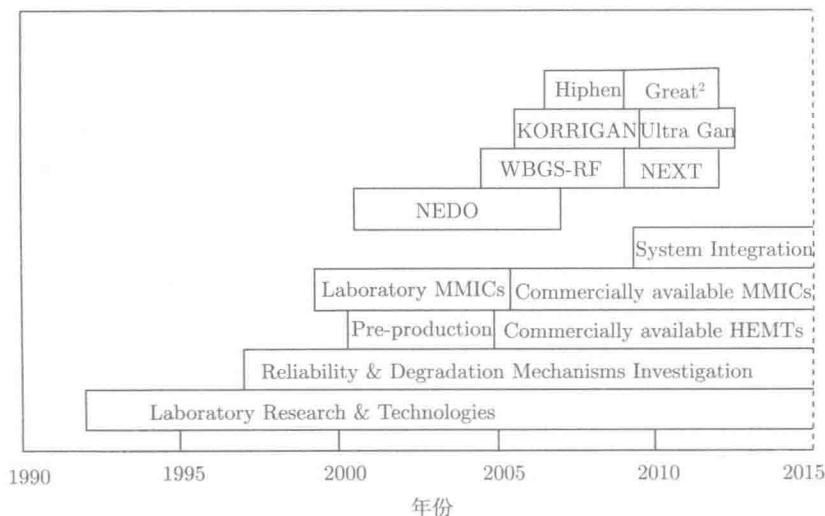


图 1-2 近期国外重要的 GaN 器件研发计划 [6]

ESCAPEE 项目计划和日本的 NEDO 计划等, 都在积极部署 GaN 的研究, 并相继推出微波毫米波频段的宽禁带半导体器件及相关电路, 不断地应用于民用科技及国防领域^[8]。在国内, 微波领域的 GaN 器件研究也已经取得显著进步, 在国家“十一五”规划重大专项中, 研发出了 C 波段到 Ka 波段的 GaN 功率器件及相关电路, 在新型核心固态微波功率器件方面获得重大突破。“十二五”规划中, 将“功率型 GaN 基芯片的设计与关键加工工艺”列为重点攻关的关键技术, 并将工作频率向毫米波及太赫兹频段扩展, 实现我国在该领域的重大跨越和可持续发展。然而, 在器件工艺、毫米波器件性能和可靠性等方面, 与国外相比还有一定差距^[9]。因此, 及时开展 GaN 关键技术研究对于国家未来电子信息技术的发展有着重要的推动作用和极大的现实意义。

1.2 微波宽禁带半导体器件进展

近 20 年来, GaN HEMT 的器件工艺、电学特性、模型等相关研究, 一直是国内外半导体器件及微波毫米波电路领域的研究热点。随着器件制作工艺技术的不断进步, GaN HEMT 的功率和频率特性得到极大的提升。现已报道的其功率密度达到 $40\text{W}/\text{mm}^{[10]}$, 最大截止频率超过了 $450\text{GHz}^{[11]}$, 应用范围从微波频段逐步地推向更高的毫米波及亚毫米频段。下面简要介绍 GaN HEMT 器件方面的国内外研究情况。

自 1993 年 Khan 等首次报道在蓝宝石 (sapphire) 衬底上外延生长制作完成 AlGaIn/GaN HEMT 以来^[12], 其发展长期受到缺乏高质量、低成本衬底的困扰。由于大尺寸、高质量的 GaN 衬底制备困难, 所以不同于其他半导体晶体管 (如 SiC、GaAs FETs 等), 目前的 GaN HEMT 都是制作在不同于它本身的半导体衬底上 (如图 1-3 所示)。随着材料技术的不断进步, 衬底材料主要有五种: GaN、蓝宝石、SiC、Si 和金刚石 (diamond)。这五种衬底在成本、热特性和电性能等方面的特点如表 1-1 所示。蓝宝石以其较优的表面质量、低成本和易于获得等优点, 在 GaN HEMT 发展的初期被广泛采用^[13], 但蓝宝石的热导率较低 (热膨胀系数约 34%), 与 GaN 之间的晶格失配 (约 14%) 严重, 位错缺陷密度达到 10^{10}cm^{-2} , 影响了载流子迁移速率, 限制了 GaN HEMT 的性能^[14]。相对于蓝宝石衬底, SiC 在热导率和晶格匹配上更优, 它具有较高的电阻率和较低的热膨胀系数失配率 (25%), 目前被广泛用作微波 GaN 功率器件衬底, 其晶圆尺寸已经做到 $6\text{in}(\text{lin}=2.54\text{cm})^{[15]}$, 但高质量的 SiC 晶圆片的工艺要求及成本依然很高。近年来, 在传统 Si 材料上制作 GaN 器件已有大量报道, 其低成本及大晶圆尺寸 (已实现 8in) 优势, 特别是使之与标准的 CMOS 工艺相结合, 这对于提高产能、降低成本以及增强系统集成度 (如微系统) 都有着重要的促进作用^[16,17]。但 Si 材料的热导率较低, 晶格失配严

重(约 17%),微波频率特性较差,在一定程度上限制了其应用范围。但是,随着外延技术的改善和位错密度的进一步降低, Si 基 GaN HEMT 器件工作频率也不断地向毫米波方向推进^[18]。此外,考虑到金刚石的热导率(2200W/(m·K))比碳化硅(SiC)大 4 倍,比硅(Si)大 13 倍,比砷化镓(GaAs)大 43 倍,是铜和银的 4~5 倍,因此为了进一步提高 GaN 器件的微波功率密度,近年来金刚石微波器件和金刚石基微波 GaN 器件也获得了关注。

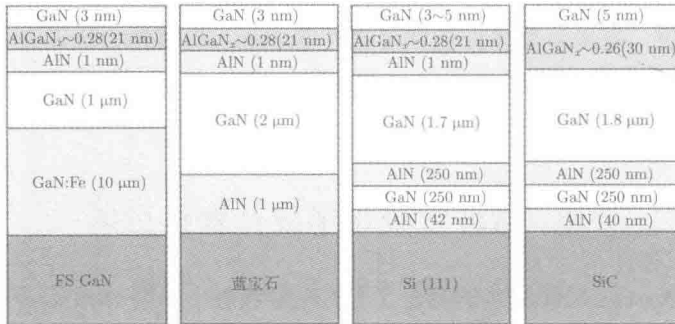


图 1-3 不同介质基板 GaN HEMT 典型器件结构示意图

表 1-1 五种半导体基板材料特性典型值比较^[2]

材料特性	蓝宝石	SiC	Si	GaN	金刚石
晶格常数 $\alpha/\text{\AA}$	4.758	3.080	5.430	3.189	3.57
击穿电场 $E_{br}/(\text{MV}/\text{cm})$	3.3	2.5	0.3	3.0	10
热导率 $\kappa/(\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K}))$	35	390~700	135~150	200	$(0.5 \sim 2) \times 10^3$
最大工作温度 $T/^\circ\text{C}$	300	600	200	700	2100
相对介电常数 ϵ_r	9	10	12	9.5	5.7
热膨胀系数失配/%	34	25	56	0	81.8
晶格失配/%	14	3.5	17	0	89
最大晶圆尺寸/in	8	6	12	2	6
成本	中等	高	低	很高	极高

下面就近年来国内外 GaN HEMT 在不同衬底的器件工艺技术、器件结构及射频特性等方面的研究作简要概述。

1. 国外研究动态

GaN HEMT 的研究始于 20 世纪 90 年代初,美国 APA 公司的 Khan 等首次报道了在蓝宝石衬底上采用低压金属有机气相沉积(MOCVD)工艺,制作了 $4\mu\text{m}$ (栅长) $\times 50\mu\text{m}$ (栅宽)的 $\text{Al}_{0.14}\text{Ga}_{0.86}\text{N}/\text{GaN}$ HEMT 器件,实现了室温下 $1.15 \times 10^{13}\text{cm}^{-2}$ 的二维电子气(2DEG)浓度,但跨导仅有 $28\text{mS}/\text{mm}$ 。随着工艺技术的改善,外延结构不断优化,通过缩小栅漏极间距,从而减小寄生电阻;制作凹栅及场板(FP)

结构,增大击穿电压和功率密度,以及提高电流增益截止频率;表面氮化硅(Si_xN_y)钝化,减小色散特性的影响等^[19]。但受限于基板材料较低的热导率特性,目前性能优异的微波毫米波 GaN HEMT 功率器件仍然以 SiC 基板材料为主导。

1996年,美国加州大学圣塔芭芭拉分校(UCSB)的Wu等研制出GaN HEMT器件在2GHz下具有1.1W/mm的输出功率密度^[20],这是首次出现GaN HEMT器件微波功率性能的报道,随后GaN HEMT器件的输出功率不断增加,工作频率不断提高。已经验证GaN HEMT器件的功率密度可超过40W/mm@4GHz^[10]和30W/mm@8GHz^[21],单个GaN HEMT器件可以获得总输出功率超过800W的能力^[22]。另一方面,随着人们对GaN性能的不断挖掘,GaN HEMT器件的工作频率、增益和效率等技术指标也在不断提升,目前已经报道了特征频率超过300GHz^[23]和可工作于W波段的高频GaN HEMT器件^[24],以及功率附加效率(PAE)达73%@4GHz的高效率GaN HEMT器件^[25]。

2000年,美国Cornell大学的Green等针对GaN HEMT频率依赖电流崩塌问题^[26],分析了它是与器件表面的悬挂键、位错及外部环境的离子吸附引起的表面陷阱态有关,这些陷阱电子由栅注入,在靠近表面区域形成电荷层,并会耗尽栅漏间高电场区沟道电子;并且,表面陷阱的时间常数较大(毫秒到秒级),在射频大信号工作时,表面层中电子难以完全调制沟道电荷,减小了射频电流摆幅和输出功率,同时,沿表面层的传导和电离也限制了器件的击穿电压。于是采用等离子增强化学气相沉积(PECVD)工艺,在器件表面沉积了350nm厚的氮化硅(Si_3N_4),在 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{AlGaIn}$ 界面形成了一层正电荷,从而增大了沟道中的面电荷密度。因此,利用该表面钝化技术,减小了影响射频电流和击穿电压特性的表面陷阱效应,实现了在4GHz频率下, $2 \times 0.5 \mu\text{m} \times 125 \mu\text{m}$ AlGaIn/GaN蓝宝石衬底HEMT器件1.0~2.0W/mm的饱和输出功率密度,峰值PAE为46%,击穿电压比其他报道的相同栅长的相同晶圆上的器件提高25%;在此工艺下,制作的 $2 \times 0.4 \mu\text{m} \times 75 \mu\text{m}$ AlGaIn/GaN HEMT,漏压为25V时,饱和输出功率密度达到4W/mm,PAE为41%。表面钝化处理虽然使得小信号跨导特性从195mS/mm增加到210mS/mm,但由于 Si_3N_4 增大了表面介电常数,以及栅极不能控制表面钝化层,以至于在靠近栅极边缘的栅漏耗尽区缩小,从而栅漏电容(C_{gd})有所增大,导致钝化前后 f_{T} 和 f_{max} 分别从25GHz和40.7GHz下降到22.7GHz和34.0GHz。

2001年,卡耐基梅隆大学的Hsu等^[27]通过理论研究发现,AlGaIn/GaN异质结电子迁移率受到AlGaIn层合金无序散射的限制,进而提出AlN插入层技术来削弱异质界面合金无序散射的设想,这一设想很快就得到验证,UCSB的Shen等^[28]生长的含1nm AlN插入层的 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结Hall迁移率达 $1540\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$,同时2DEG密度高达 $1.48 \times 10^{13}\text{cm}^{-2}$,由它研制的HEMT器件最大电流达到1A/mm,8GHz下输出功率密度为8.4W/mm。此后,人们开始在

AlGa_N/Ga_N 异质结中广泛采用薄 AlN 插入层。同一年, Cornell 大学的 Eastman 教授等提出 Ga_N 帽层结构, 该结构用于提升 AlGa_N 势垒层的有效势垒高度, 改善 AlGa_N/Ga_N HEMT 器件的肖特基特性, 降低栅泄漏电流 [29]。另一方面, 与 AlGa_N 相比, Ga_N 层表面陷阱较少, 可以抑制由此导致的电流崩塌现象。

2004 年, 美国 HRL(Hughes Research Laboratories) 实验室的 Micovic 等提出 AlGa_N 背势垒结构, 该结构可强化 Ga_N HEMT 器件沟道阱的量子限制作用, 改善器件的夹断特性和射频工作性能 [30]。另一方面, 由于 AlGa_N 比 Ga_N 的禁带宽度大, 因此 AlGa_N 背势垒结构可以增加器件的击穿电压, Yu 等 [31] 研究认为, 由于采用了厚 AlGa_N 背势垒结构, 2.3 μm 厚的缓冲层可以获得 510V 的垂直击穿电压。

2008 年, UCSB 的 Chu 等 [32] 又采用一种“V”型栅斜场板结构开发出适用于 X 波段功率放大器应用的 Ga_N HEMT 器件, 该器件结构在不牺牲带宽的情况下, 解决了提高击穿电压与抑制电流崩塌之间的矛盾, 在 10GHz 频率下获得了 12.2W/mm 的功率密度和 65% 的功率附加效率。场板和 MIS(metal insulator semiconductor) 结构的采用可以使 Ga_N 基 HEMT 的击穿电压达到 1.8kV [33]。

2011 年, Lecourt 等基于 0.225 μm 工艺在蓝宝石基板上制作了 InAlN/Ga_N HEMT 器件 [34], 在 18GHz 时, 输出功率密度达到 2.9W/mm, f_{T} 和 f_{max} 分别达到 52GHz 和 120GHz。InAlN/Ga_N 器件可以使用较薄的势垒层, 这对于高频性能是一大优势, 因为高的栅长/势垒厚度纵横比可以避免制作凹栅, 缓解短沟道效应; 且仍保持较高的面载流子浓度, 它的面载流子浓度是传统 AlGa_N/Ga_N 器件的两倍。同年, 该作者将栅长缩小到 0.110 μm 时, f_{T} 和 f_{max} 分别达到 80GHz 和 130GHz [35]。

2012 年, Mishra 小组在蓝宝石基板上制作了 T 型栅 N 面 Ga_N/InAlN MIS HEMT 器件 [36]。N 面极化 HEMT 引入了内建背势垒, 可增强对沟道电子的限制作用, 极大地降低接触电阻, 且栅到沟道距离可用背势垒灵活地调节; T 型栅结构减小了栅电阻和寄生栅漏电容, 从而提高了 f_{max} 。报道的 2 \times 0.1 μm \times 12.5 μm 器件 f_{max} 达到了 400GHz。基于此工艺, 在漏极电压为 50V 时, 频率为 4GHz, 输出功率密度达到了 12.1W/mm, PAE 为 55% [37]。

SiC 具有较高的热导率和绝缘特性, 是目前在微波毫米波 Ga_N HEMT 器件中应用最广的衬底。20 世纪 90 年代末, 高质量 4H-SiC 衬底的出现为 Ga_N HEMT 的迅速发展提供了重要的基础 [38]。2010 年, Sarazin 等基于 0.25 μm 工艺在 SiC 基板上制作的 AlInN/AlN/Ga_N HEMT 器件 [39], 在 10GHz 时, 输出功率密度达到 10W/mm, PAE 为 51%, 同时优化了异质结性能, 低阻的欧姆接触及有效的表面钝化降低了漏极电流崩塌, 使得跨导超过 450mS/mm。2013 年, Schuette 等利用凹栅集成的 E/D(增强/耗尽) 工艺在 SiC 基板上制作了 $f_{\text{T}}/f_{\text{max}}$ 大于 300GHz 的 Ga_N HEMT [40]。首次报道了在同一晶圆上制作 E/D 模 Ga_N HEMT, 但受到栅漏击穿电压的限制, 三端 E/D 模击穿电压分别只有 10.7V 和 11.8V。

GaN 基 GaN HEMT 由于没有晶格失配等缺陷问题, 电流崩塌等色散效应远低于其他基板材料的 GaN HEMT 器件, 位错密度比传统异质结外延工艺低约 6 个数量级^[41]。2013 年, Meyer 等首次在 GaN 基板上制作了 AlN/GaN MOS-HEMT 器件^[42], 栅长 0.1 μm , 电流密度达到 1.25A/mm, f_T 和 f_{max} 分别为 165GHz 和 171GHz, 工作频率为 40GHz 时, 输出功率密度为 1W/mm, 增益为 4.6dB, PAE 为 17%。晶圆级 GaN 基 GaN HEMT 仍需要进一步研究和探索。

Si 具有晶圆尺寸大、产量高、易集成及价格便宜等优势, 近年来 Si 基 GaN HEMT 器件也获得了迅猛发展。虽然 Si 具有成本上的巨大优势, 但是从表 1-1 中可以发现, Si 衬底用于与 GaN 集成时存在很多缺陷^[43]。首先, Si 衬底上外延 GaN, 其晶格失配为 16.9%, 在生长过程中的晶格失配将引入大量位错。其次, Si 衬底和 GaN 之间较大的热膨胀系数差异导致较大的热失配。Si 的热膨胀系数为 $3.59 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$, 而 GaN 的热膨胀系数为 $5.59 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$, 二者相差很大, 造成高温生长后降温的过程中外延层将承受很大的张应力, 由于外延层的厚度远小于衬底厚度, 所以外延层会产生裂纹^[44-46]。另一个是极性问题, 由于 Si 原子间形成的是纯共价键, 属非极性半导体, 而 GaN 原子间的是极性键, 属极性半导体。对于极性/非极性异质结界面, 有许多物理性质不同于传统异质结器件, 所以界面原子、电子结构、晶格失配、界面电荷和偶极矩、带阶、输运特性等都会有很大的不同, 这也是研究 Si 衬底 GaN 基材料和器件所必须认识到的问题。最后, Si 衬底上 Si 原子的扩散也是一个重要问题, 在高温生长过程中 Si 原子的扩散加剧, 导致外延层中会含有一定量的 Si 原子, 这些 Si 原子易于与生长气氛中的氨气发生反应, 而在衬底表面形成非晶态 Si_xN_y 薄膜, 降低外延层的晶体质量。另外, Ga 原子也可以扩散到 Si 衬底表面发生很强的化学反应, 将对衬底产生回熔而破坏界面, 降低外延层的晶体质量。

针对以上几个缺陷, 国内外研究机构经过研究, 已取得了不错的研究成果。缓冲层技术的引入是解决 Si 衬底上生长 GaN 时晶格失配、Si 扩散和极性问题的主要有效手段, 同时在一定程度上也可缓解薄膜中的应力。柏林工业大学、韩国全北国立大学、韩国成均馆大学、以色列理工学院、德国马格德堡大学等高校的研究人员都曾分别对使用 ZnO ^[47]、 $3\text{C}_2\text{SiC}$ ^[48,49]、 AlN ^[50,51] 和 AlAs ^[52] 等材料作为 GaN 外延层与 Si 衬底之间的缓冲层进行尝试, 其中 AlN 结果最好, 这是由于 AlN 缓冲层在 Si 衬底上具有较好的浸润性, 可有效减少界面能, 使 GaN 一开始就进入二维生长模式, 部分缓解了 Si 基 GaN 生长的困难, 此外 AlN 还可以和 GaN 在同一反应室进行生长, 且 Al—N 键形成优于 Si—N 键, 在一定程度上抑制 SiN_x 的形成。以色列理工学院以及中国科学院的研究人员通过优化 AlN 缓冲层的生长条件如生长温度、厚度、V/III 比、反应室压强等, 得到了高质量的 GaN 外延膜^[50,53]。但由于缓冲层技术条件下生长出的 GaN 材料仍具有较高的缺陷密度, 会影响到发光器件

的发光强度、工作寿命和反向特性等重要技术指标,因此人们又在该基础上发展了多缓冲层技术,从而获得更高质量的 GaN 单晶材料。另外,由于 Si 衬底与 GaN 外延层的热失配较大,单纯采用缓冲层得到的无裂纹的 GaN 外延层的厚度比较有限(1 μm 左右),微裂问题已经成为影响 Si 衬底 GaN 外延生长的最主要的障碍。各国相继开展解决微裂问题的研究,比较具有代表性的成果有:韩国的 Kimn 等提出的梯度组分 AlGaIn 缓冲层法^[54]、美国的 Seon 等提出的超晶格缓冲层法^[55]、日本的 Honda 等提出的选择区域外延(SAG)法^[56]以及德国的 Krost 等提出的低温 AlN 插入层技术^[44]。其中,低温 AlN 插入层被认为是解决 Si 衬底 GaN 基材料微裂的最简单有效的方法。在实际的生长过程中,也可将几种方法综合在一起使用。

随着工艺及制造技术的不断提升,结合现有的诸如 MOCVD^[57]、分子束外延^[58](MBE)、氢化物气相外延^[59](HVPE)等外延生长技术,Si 衬底上外延生长 GaN 中碰到的衬底晶格失配、衬底热失配等问题将逐步得到解决。

2010 年, Lecourt 等基于 0.125 μm 工艺在 Si 基板上制作的 AlGaIn/GaN HEMT^[60],采用 12.5nm 的薄势垒层,峰值跨导达到 332mS/mm, f_T 和 f_{max} 分别达到 75GHz 和 125GHz。2012 年, Marti 等首次在 Si 基板上研制了截止频率达到 150GHz、在 40GHz 时输出功率密度达到 2W/mm 的 AlGaIn/GaN HEMT^[61]。它是由 Nitronex 公司的 75nm、100nm 和 200nm 栅长工艺制作了三种凹栅 AlGaIn/GaN HEMT,器件结构包括成核过渡层、1.7 μm GaN 缓冲层、1nm AlN 间隔层、17.5nm Al_{0.26}Ga_{0.74}N 势垒层、2nm 帽层及 75nm 厚的 SiN 钝化层。850 $^{\circ}\text{C}$ 快速高温退火形成 Ti/Al/Mo/Au 欧姆接触层, Ni/Pt/Au 金属堆积形成栅极,栅茎高 200nm,栅顶端宽 500nm。小信号测试表明,75nm 栅长器件的截止频率达到 152GHz;200nm 栅长器件偏置在 $V_{\text{gs}} = -2\text{V}$, $V_{\text{ds}} = 20\text{V}$, 输入频率为 40GHz 时,输出功率密度达到 2.05W/mm,最大 PAE 为 18.5%。而在此之前,20GHz 以上的 Si 基板 GaN HEMT 少有报道,性能最优的是 2004 年, Johnson 等报道的在 2.4GHz 时输出功率密度为 12W/mm^[62],以及 2006 年, Ducatteau 等报道在 18GHz 时输出功率密度达到 5.1W/mm^[63]。同年, Medjdoub 等在 Si 基板上制作了双异质结 AlN/GaN HEMT 器件^[64]。通过优化势垒/Si 界面质量减小 RF 损耗,降低 Al 组分以减小热阻,以及基片减薄增强散热等技术,使得 f_{max} 首次接近 200GHz,在偏置电压 $V_{\text{ds}} = 15\text{V}$, 40GHz 时,输出功率密度达到 2.5W/mm。到 2015 年, Altuntas 等将该频率下的输出功率提高到 2.7W/mm^[65],但仍受限于低的热导率,增益和 PAE 较低。2015 年, Jatal 等利用 3C-SiC 转移层在 Si 基板上制作了 GaN HEMT^[66]。由于 Si 容易向 GaN 层扩散,因此在 Si 基板上引入较薄的 SiC 转移层。器件栅长 80nm,最大电流密度为 1.13A/mm,峰值跨导为 388mS/mm, f_T 达到了 176GHz。同年, Marti 等首次报道了 Si 基 AlInN/GaN HEMT 在 94GHz 的大信号特性^[18]。器件栅长 50nm,漏极电流密度达到 1.6A/mm,峰值跨导为 650mS/mm, f_T 和 f_{max} 分别为 141GHz 和 232GHz,