

半导体科学与技术丛书

氮化物宽禁带半导体 材料与电子器件

郝跃 张金风 张进成 著



科学出版社

www.sciencep.com

半导体科学与技术丛书

氮化物宽禁带半导体 材料与电子器件

郝 跃 张金凤 张进成 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以作者多年的研究成果为基础,系统地介绍了 III 族氮化物宽禁带半导体材料与电子器件的物理特性和实现方法,重点介绍了半导体高电子迁移率晶体管(HEMT)与相关氮化物材料。全书共 14 章,内容包括:氮化物材料的基本性质、异质外延方法和机理,HEMT 材料的电学性质,Al-GaN/GaN 和 InAlN/GaN 异质结的生长和优化、材料缺陷分析, GaN HEMT 器件的原理和优化、制备工艺和性能、电热退化分析, GaN 增强型 HEMT 器件和集成电路, GaN MOS-HEMT 器件,最后给出了该领域未来技术发展的几个重要方向。

本书可供微电子、半导体器件和材料领域的研究生与科研人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

氮化物宽禁带半导体材料与电子器件 郝跃,张金凤,张进成著.

—北京:科学出版社,2013.1

(半导体科学与技术丛书)

ISBN 978-7-03-036717-4

I. ①氮… II. ①郝… ②张… ③张… III. ①氮化物—禁带—半导体材料 ②氮化物—禁带—电子器件 IV. ①TN304 ②TN103

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 030044 号

责任编辑:朱雪玲 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张倩 / 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>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 1 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2013 年 1 月第一次印刷 印张:20

字数:390 000

定价:86.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《半导体科学与技术丛书》编委会

名誉顾问：王守武 汤定元 王守觉

顾 问：(按姓氏拼音排序)

陈良惠 陈星弼 雷啸霖 李志坚 梁骏吾 沈学础
王 圩 王启明 王阳元 王占国 吴德馨 郑厚植
郑有焯

主 编：夏建白

副 主 编：陈弘达 褚君浩 罗 毅 张 兴

编 委：(按姓氏拼音排序)

陈弘毅 陈诺夫 陈治明 杜国同 方祖捷 封松林
黄庆安 黄永箴 江风益 李国华 李晋闽 李树深
刘忠立 鲁华祥 马骁宇 钱 鹤 任晓敏 邵志标
申德振 沈光地 石 寅 王国宏 王建农 吴晓光
杨 辉 杨富华 余金中 俞育德 曾一平 张 荣
张国义 赵元富 祝宁华

《半导体科学与技术丛书》出版说明

半导体科学与技术在 20 世纪科学技术的突破性发展中起着关键的作用,它带动了新材料、新器件、新技术和新的交叉学科的发展创新,并在许多技术领域引起了革命性变革和进步,从而产生了现代的计算机产业、通信产业和 IT 技术。而目前发展迅速的半导体微/纳电子器件、光电子器件和量子信息又将推动本世纪的技术发展和产业革命。半导体科学技术已成为与国家经济发展、社会进步以及国防安全密切相关的重要的科学技术。

新中国成立以后,在国际上对中国禁运封锁的条件下,我国的科技工作者在老一辈科学家的带领下,自力更生,艰苦奋斗,从无到有,在我国半导体的发展历史上取得了许多“第一个”的成果,为我国半导体科学技术事业的发展,为国防建设和国民经济的发展做出过有重要历史影响的贡献。目前,在改革开放的大好形势下,我国新一代的半导体科技工作者继承老一辈科学家的优良传统,正在为发展我国的半导体事业、加快提高我国科技自主创新能力、推动我们国家在微电子和光电子产业中自主知识产权的发展而顽强拼搏。出版这套《半导体科学与技术丛书》的目的是总结我们自己的工作成果,发展我国的半导体事业,使我国成为世界上半导体科学技术的强国。

出版《半导体科学与技术丛书》是想请从事探索性和应用性研究的半导体工作者总结和介绍国际和中国科学家在半导体前沿领域,包括半导体物理、材料、器件、电路等方面的进展和所开展的工作,总结自己的研究经验,吸引更多的年轻人投入和献身到半导体研究的事业中来,为他们提供一套有用的参考书或教材,使他们尽快地进入这一领域中进行创新性的学习和研究,为发展我国的半导体事业做出自己的贡献。

《半导体科学与技术丛书》将致力于反映半导体学科各个领域的基本内容和最新进展,力求覆盖较广阔的前沿领域,展望该专题的发展前景。丛书中的每一册将尽可能讲清一个专题,而不求面面俱到。在写作风格上,希望作者们能做到以大学高年级学生的水平为出发点,深入浅出,图文并茂,文献丰富,突出物理内容,避免冗长公式推导。我们欢迎广大从事半导体科学技术研究的工作者加入到丛书的编写中来。

愿这套丛书的出版既能为国内半导体领域的学者提供一个机会,将他们的累累硕果奉献给广大读者,又能对半导体科学和技术的教学和研究起到促进和推动作用。

夏建白

2005 年 3 月 16 日

序 言

自 2000 年以来,III 族氮化物半导体异质结构及其电子器件得到了快速的发展,在功率密度、效率、频率和带宽等方面不断刷新半导体器件的记录。在 2005 年氮化物半导体微波功率器件开始进入市场,2010 年前后氮化物半导体功率开关器件开始出现商业产品。随着技术的不断进步和应用优势的不断体现,氮化物半导体电子器件越来越多地受到关注。除了电子器件,氮化物半导体在新一代照明器件 LED、短波长激光器件和探测器件等领域已经取得了显著的成功。因此,“III 族氮化物已经成为硅之后最重要的半导体”这一观点得到了学术界和产业界的普遍共识。

虽然在异质结构和电子器件的概念、结构等方面,氮化物半导体与第二代半导体 GaAs、InP 等并无本质区别,但在物理性质、制备工艺、工作机制和性能表现等方面,氮化物半导体还是呈现出许多显著特点,如高密度二维电子气主要由强极化效应诱导产生,材料主要依靠异质外延生长,影响器件稳定性与可靠性的独特电流崩塌效应与逆压电极化效应,等等。因此,氮化物半导体电子器件领域以及相关领域的研究人员多年期盼能有一部详细论述氮化物半导体异质结构和电子器件的专著,但是国内一直缺少这样的作品。

为此,在本书中作者结合自己在氮化物半导体异质结构和电子器件方面十多年的研究经历、积累和成果,尝试对 III 族氮化物半导体材料和电子器件给出较系统的论述。

作者所在的西安电子科技大学宽禁带半导体材料和器件重点实验室自 1997 年开始从事 III 族氮化物半导体材料和电子器件的研究,在国内属于较早开展此领域研究的团队之一。本书主要结合作者及其研究团队在该领域的研究结果,系统介绍了 III 族氮化物材料和电子器件。在氮化物材料部分(第 2~8 章)介绍了氮化物半导体材料的基本性质、异质外延方法和机理,异质结电学性质的分析,AlGaIn/GaN 和 InAlN/GaN 异质结的生长和优化、材料缺陷分析等内容;在氮化物电子器件部分(第 9~13 章)介绍了 GaN HEMT 器件的原理和优化、制备工艺和性能、电热退化研究,GaN 增强型 HEMT 和 GaN MOS-HEMT 器件研究等内容。第 14 章给出了氮化物半导体材料和电子器件进一步发展的方向。本书可供在相关领域从事科研和教学工作的人员参考。

作者所在研究团队从事氮化物半导体材料和电子器件的研究,此间有多位教师、博士研究生和硕士研究生贡献了他们的聪明才智,其贡献都反映在本书各章的

参考文献中。同时,作者所在的重点实验室与国内外多家科研院所和大专院校开展了长期的科研合作,本书也凝结了大家共同的思想结晶。作者真诚地感谢支持和帮助我们进步和发展的各位专家、同行和朋友,感谢共同奋斗的各位同事和同学。感谢国家自然科学基金、国家高技术研究发展计划(863计划)、国家重点基础研究发展计划(973计划)、国家科技重大专项和国防科技与研究计划对宽禁带半导体科技的长期支持。我们希望在氮化物半导体材料和电子器件的科学研究、产品开发和教学培训过程中,本书可以在学术参考和研究思路等方面对读者有所帮助,以此推动氮化物半导体材料和电子器件的进一步发展。

由于作者水平有限,本书难免有不足和疏漏之处,敬请广大读者提出意见和建议。



2012年9月

目 录

《半导体科学与技术丛书》出版说明

序言

第 1 章 绪论	1
参考文献	4
第 2 章 III 族氮化物半导体材料的性质	6
2.1 III 族氮化物的晶体结构和能带结构	6
2.1.1 GaN、AlN 和 InN	6
2.1.2 氮化物合金材料的晶格常数和禁带宽度	9
2.1.3 异质结界面的能带带阶	10
2.2 氮化物的电子速场关系和低场迁移率	10
2.2.1 GaN 的电子速场关系	10
2.2.2 GaN 和 AlGaN 的电子低场迁移率和速场关系解析模型	11
2.3 氮化物材料的极化效应	15
2.3.1 极性	15
2.3.2 自发极化和压电极化效应	16
2.3.3 氮化物合金材料的压电和自发极化强度	17
2.3.4 削弱极化效应的机制	19
2.3.5 极性材料和非极性/半极性材料	20
2.4 氮化物电子材料的掺杂和其他性质	21
2.5 氮化物材料性质测试分析	22
2.5.1 高分辨 X 射线衍射(HRXRD)	22
2.5.2 原子力显微镜(AFM)	26
2.5.3 扫描电子显微镜(SEM)	28
2.5.4 透射电子显微镜(TEM)	28
2.5.5 光致发光谱(PL 谱)	29
2.5.6 电容-电压测试(C-V)	31
2.5.7 范德堡法霍尔测试	32
2.5.8 霍尔条测试 SdH 振荡分析二维电子气输运性质	33

参考文献	35
第 3 章 氮化物材料的异质外延生长和缺陷性质	39
3.1 氮化物材料的外延生长技术	39
3.2 外延生长基本模式和外延衬底的选择	42
3.2.1 外延生长的基本模式	43
3.2.2 外延衬底的选择	44
3.3 MOCVD 生长氮化物材料的两步生长法	46
3.3.1 两步生长法的步骤	46
3.3.2 蓝宝石上两步法生长 GaN 的生长模式演化	48
3.4 氮化物材料外延的成核层优化	49
3.4.1 低温 GaN 成核层	49
3.4.2 高温 AlN 成核层	50
3.4.3 间歇供氮生长的高温 AlN 成核层	52
3.5 氮化物材料外延层生长条件对材料质量的影响	53
3.6 氮化物单晶薄膜材料的缺陷微结构	57
3.6.1 衬底与成核层界面的微结构——失配位错	57
3.6.2 成核层内的微结构——堆垛层错、局部立方相和反向边界	58
3.6.3 高温 GaN 层的微结构——小角晶界、穿透位错和点缺陷	61
3.6.4 裂纹和沉淀物	63
参考文献	64
第 4 章 GaN HEMT 材料的电学性质与机理	66
4.1 GaN 异质结中的二维电子气	66
4.1.1 GaN 异质结二维电子气的形成机理	66
4.1.2 GaN 异质结二维电子气的面电子密度	68
4.2 GaN 异质结中导带和载流子分布的一维量子效应自洽解	70
4.2.1 一维薛定谔-泊松方程量子效应自洽解物理模型	71
4.2.2 一维薛定谔-泊松方程自洽解模型的数值算法	72
4.2.3 一维量子效应自洽解在 GaN 异质结中的应用	74
4.3 GaN 异质结二维电子气低场迁移率的解析建模分析	77
4.3.1 GaN 异质结二维电子气低场迁移率的解析建模	77
4.3.2 AlGaIn/GaN 异质结 Al 组分对迁移率的影响	80
4.3.3 晶格匹配 InAlN/GaN 和 InAlN/AlN/GaN 材料二维电子气输运特性	83
参考文献	86

第 5 章 AlGaIn/GaN 异质结材料的生长与优化方法	88
5.1 AlGaIn/GaN 异质结材料结构	88
5.2 低缺陷密度氮化物材料生长方法	90
5.3 斜切衬底生长低缺陷 GaN 缓冲层	94
5.4 GaN 的同质外延	96
5.4.1 斜切衬底上 HVPE 生长 GaN	97
5.4.2 HVPE GaN 模板上 MOCVD 外延 GaN	98
5.5 高阻 GaN 外延方法	102
5.5.1 缓冲层漏电的表征方法	102
5.5.2 位错对衬底 O 扩散的影响	103
5.5.3 掩埋电荷层抑制方案	105
5.5.4 GaN 缓冲层背景 n 型掺杂的抑制	106
5.6 AlGaIn 势垒层的优化	107
5.6.1 AlGaIn 势垒层 Al 组分和厚度对材料 2DEG 性质的影响	107
5.6.2 AlN 界面插入层的作用	109
5.6.3 帽层对异质结材料性质的影响	112
参考文献	115
第 6 章 AlGaIn/GaN 多异质结材料与电子器件	117
6.1 Al(Ga, In)N/InGaIn/GaN 材料	117
6.2 GaN 沟道下引入 AlGaIn 背势垒	119
6.3 InGaIn 背势垒结构	123
6.4 双/多沟道 AlGaIn/GaN 异质结	124
参考文献	128
第 7 章 脉冲 MOCVD 方法生长 InAlN/GaN 异质结材料	129
7.1 近晶格匹配 InAlN/GaN 材料的优势及其 HEMT 特性	129
7.2 近晶格匹配 InAlN/GaN 材料的生长、缺陷和电学性质	131
7.2.1 近晶格匹配 InAlN/GaN 材料的生长和缺陷	131
7.2.2 近晶格匹配 InAlN/GaN 材料的电学性质	133
7.3 表面反应增强的脉冲 MOCVD(PMOCVD)方法	135
7.4 PMOCVD 方法生长 InAlN/GaN 异质结	136
7.4.1 外延生长压强对 InAlN/GaN 的性能影响	138
7.4.2 In 源脉冲时间对 InAlN/GaN 的性能影响	139
7.4.3 外延生长温度对 InAlN/GaN 的性能影响	140
7.5 PMOCVD 方法生长 InAlN/GaN 双沟道材料	142

参考文献	146
第 8 章 III 族氮化物电子材料的缺陷和物性分析	148
8.1 腐蚀法分析 GaN 位错类型和密度	148
8.1.1 腐蚀坑形状与位错类型的对应关系	148
8.1.2 湿法腐蚀准确估计不同类型位错的密度	150
8.1.3 腐蚀法分析 GaN 的其他类型缺陷——反向边界和小角晶界	152
8.2 不同极性面材料的腐蚀形貌和成因	153
8.2.1 N 面材料的腐蚀特性	153
8.2.2 非极性 α 面 GaN 的选择性腐蚀	155
8.3 斜切衬底降低位错密度的机理分析	158
8.3.1 斜切衬底上 GaN 的位错类型和位错扎堆现象	158
8.3.2 斜切衬底上 GaN 中位错的集中湮灭	159
8.4 极性对杂质结合和黄带的影响	161
8.4.1 与极性有关的杂质结合模型	161
8.4.2 杂质结合对黄带的影响	163
8.5 GaN 中黄带的深受主来源	164
8.5.1 GaN 中黄带与 C 杂质的相关性分析	164
8.5.2 对 Ga 空位引起黄带发光的否定性讨论	168
参考文献	169
第 9 章 GaN HEMT 器件的原理和优化	171
9.1 GaN HEMT 器件的工作原理	171
9.2 GaN HEMT 器件的性能参数	173
9.2.1 直流性能参数	173
9.2.2 交流小信号跨导	174
9.2.3 截止频率 f_T 和最高振荡频率 f_{max}	175
9.2.4 功率性能参数	177
9.3 GaN HEMT 器件性能的优化措施	178
9.4 提高器件击穿电压的场板结构仿真和实现	181
9.4.1 场板 HEMT 器件的仿真优化	181
9.4.2 场板 HEMT 器件的实现	183
9.4.3 浮空场板结构的提出、优化和实现	184
参考文献	188

第 10 章 GaN HEMT 器件的制备工艺和性能	189
10.1 表面清洗、光刻和金属剥离	189
10.1.1 表面清洗	189
10.1.2 光刻与金属剥离	189
10.2 器件隔离工艺	190
10.2.1 器件隔离方法	190
10.2.2 常见 GaN 干法刻蚀方法	191
10.2.3 等离子体刻蚀的机理和评估	192
10.3 肖特基金属半导体接触	193
10.3.1 肖特基结特性参数的提取方法	194
10.3.2 GaN 和 AlGaIn/GaN 异质结上肖特基结的特性评估	195
10.3.3 不同溶液预处理对肖特基结特性的影响分析	197
10.4 欧姆接触	197
10.4.1 GaN 与 AlGaIn/GaN 的欧姆接触的设计原则	198
10.4.2 欧姆接触性能的测试方法——传输线模型	199
10.4.3 欧姆接触性能的优化	200
10.5 半导体器件的表面钝化	202
10.6 器件互连线电镀和空气桥	204
10.6.1 电镀	204
10.6.2 空气桥	204
10.7 GaN HEMT 器件的工艺流程	206
10.8 GaN HEMT 器件的性能与分析	208
10.8.1 器件的直流性能	208
10.8.2 器件的小信号特性	209
10.8.3 器件的微波功率性能	209
参考文献	210
第 11 章 GaN HEMT 器件的电热退化与可靠性	212
11.1 GaN HEMT 器件的电流崩塌	212
11.2 GaN HEMT 器件电退化的 3 种机理模型	214
11.2.1 热电子注入	214
11.2.2 栅极电子注入	214
11.2.3 逆压电效应	214
11.3 GaN HEMT 的电应力退化(一)	216
11.3.1 沟道热电子注入应力	216

11.3.2	栅极电子注入应力	217
11.3.3	V_{DS} 为零的栅压阶梯式应力	218
11.4	GaN HEMT 的电应力退化(二)	219
11.4.1	源漏高压开态应力	219
11.4.2	栅漏高压应力——关态和开态	221
11.4.3	脉冲应力	223
11.4.4	改善 HEMT 器件电应力退化效应的措施	224
11.5	GaN HEMT 的变温特性	225
11.5.1	温度对肖特基接触性能的影响	226
11.5.2	温度对欧姆接触性能和材料方块电阻的影响	226
11.5.3	温度对 AlGaIn/GaN HEMT 器件特性的影响	227
11.6	GaN HEMT 的高温存储特性	229
	参考文献	233
第 12 章	GaN 增强型 HEMT 器件和集成电路	235
12.1	GaN 增强型 HEMT 器件	235
12.2	氟等离子体注入增强型器件的工艺与特性	240
12.2.1	增强型器件的结构和工艺	240
12.2.2	增强型器件的直流、击穿和小信号性能	240
12.2.3	氟等离子体注入器件的栅漏二极管分析	241
12.3	氟等离子体注入 E-HEMT 的可靠性评估	244
12.3.1	氟等离子体注入 E-HEMT 在电应力下的特性退化分析	244
12.3.2	氟等离子体注入 E-HEMT 在高温下的特性退化分析	247
12.4	氟等离子体注入 E-HEMT 器件的结构优化	249
12.4.1	薄势垒层常规 HEMT 器件	249
12.4.2	薄势垒层氟等离子体注入增强型器件	251
12.5	增强/耗尽型 GaN 数字集成电路	252
12.5.1	增强/耗尽型数字集成电路单元设计	252
12.5.2	数字集成电路单元的版图设计和工艺实现	253
12.5.3	数字集成电路单元的测试和抗辐照特性分析	254
	参考文献	258
第 13 章	GaN MOS-HEMT 器件	261
13.1	GaN MIS-HEMT 器件的研究进展	261
13.2	高 K 栅介质材料的选择和原子层淀积	263
13.2.1	高 K 栅介质材料的选择	263

13.2.2	原子层淀积工艺	265
13.3	高 K 栅介质 AlGaIn/GaN MOS 电容的基本特性和界面态密度	266
13.3.1	高 K 栅介质 AlGaIn/GaN MOS 电容的载流子浓度分布计算	266
13.3.2	高 K 栅介质 AlGaIn/GaN MOS 电容的 C-V 滞后特性	267
13.3.3	高 K 栅介质 AlGaIn/GaN MOS 电容的变频 C-V 特性	268
13.4	HfO ₂ /Al ₂ O ₃ 高 K 堆层栅介质 AlGaIn/GaN MOS-HEMT 器件	270
13.4.1	原子层淀积 HfO ₂ /Al ₂ O ₃ 高 K 堆层栅介质的设计	270
13.4.2	HfO ₂ /Al ₂ O ₃ 堆层栅介质 MOS-HEMT 的直流特性	271
13.4.3	HfO ₂ /Al ₂ O ₃ 堆层栅介质的钝化特性	272
13.4.4	HfO ₂ /Al ₂ O ₃ 堆层栅介质 MOS-HEMT 的频率特性	272
13.5	AlGaIn/AlN/GaN 凹栅 MOS-HEMT 器件	273
13.5.1	凹栅刻蚀深度对原子层淀积 Al ₂ O ₃ 栅介质 MOS-HEMT 器件性能的影响	274
13.5.2	等离子体处理对凹栅 MOS-HEMT 器件性能的影响	278
13.5.3	高性能 AlGaIn/AlN/GaN 凹栅 MOS-HEMT 器件	278
13.6	薄势垒层增强型 MIS-HEMT	283
	参考文献	284
第 14 章	氮化物半导体材料和电子器件的发展	288
14.1	N 极性面氮化物材料与器件	288
14.2	超宽禁带氮化物半导体材料和电子器件	289
14.3	氮化物半导体电力电子器件	292
14.4	氮化物太赫兹电子器件	293
14.5	硅基氮化物材料和器件	294
	参考文献	296
附录	缩略语表	300
	《半导体科学与技术丛书》已出版书目	304

第 1 章 绪 论

半导体科技是二十世纪最重要和最有影响的高新科技之一,其重要性和影响力一直延伸到了二十一世纪。半导体科技之所以如此重要,是因为它支撑了整个人类信息社会的发展和进步,同时改变了人类社会的生产、生活、交往和思维方式。半导体材料一直在半导体科技的发展过程中发挥着重要的作用。1947年,世界上第一只晶体管被发明,它采用半导体锗(Ge)材料,在室温下的禁带宽度为 0.66 eV;1958年诞生的第一块集成电路实际上是一块混合型集成电路,真正意义上的第一块单片集成电路是在 1961 年诞生的,使用的依然是 Ge 材料。到了 1965 年,半导体硅(Si)材料(室温禁带宽度为 1.12 eV)超越 Ge 材料成为半导体集成电路的主要材料。直到今天, Si 材料仍然是微电子技术的主要半导体材料,无论集成电路还是太阳能电池,绝大部分半导体产业以 Si 材料作为支撑。我们通常称 Si 和 Ge 为第一代半导体,主要是因为它们的发展历史较长。第二代半导体材料砷化镓(GaAs,室温禁带宽度为 1.42 eV)和磷化铟(InP,室温禁带宽度为 1.35 eV)是二十世纪七十年代引入的,主要是满足超高速、微波大功率器件和集成电路的需求。直到 1997 年, InP 集成电路才实现产品化。二十世纪末,第三代半导体(宽禁带半导体)如氮化镓(GaN,室温禁带宽度为 3.45 eV)和碳化硅(SiC, 4H-SiC 室温禁带宽度为 3.25 eV)开始有了重要发展。

第二代半导体材料 GaAs 与 Si 相比,除了禁带宽度增大外,其电子迁移率与电子饱和速度分别是 Si 的 6 倍和 2 倍(如表 1.1 所示),因此其器件适合高频工作。GaAs 场效应管器件还具有噪声低、效率高和线性度好的特点。但相比于第三代半导体 GaN 和 SiC 来讲, GaAs 材料的热导率和击穿场强不高,因此其功率特性受到了一定的限制。二十世纪八十年代初, GaAs 金属半导体场效应管(MESFET)的最高输出功率为 1.4 W/mm@8 GHz^[1]。虽然后来研究人员不断尝试各种方法以提高其性能,但是提高功率密度仍然有限,目前最高功率密度仅达到 1.57 W/mm@1.1 GHz^[2],而且这是通过牺牲一定的工作频率而获得的。

表 1.1 不同半导体材料的物理参数

物理参数	Si	GaAs	4H-SiC	GaN
禁带宽度 E_g /eV	1.12	1.42	3.25	3.45
相对介电常数 ϵ	11.4	13.1	9.7	8.9
电子迁移率 μ_e /[cm ² /(V·s)]	1400	8500	1020	1000(GaN) 2000(AlGaN/GaN)
击穿场强 E_c /(MV/cm)	0.3	0.4	3.0	3.3

续表

物理参数	Si	GaAs	4H-SiC	GaN
热导率 κ / [W/(cm·K)]	1.5	0.5	4.9	2.0
电子饱和速度 $v_{\text{sat}}/(10^7 \text{ cm/s})$	1.0	2.0	2.0	2.7
Baliga 优值(高频) $\mu_c E_c^2$	1	11	73	180
Baliga 优值(低频) $\epsilon \mu_c E_c^3$	1	16	600	1450

二十世纪九十年代初,采用 Si_3N_4 作为绝缘栅的 InP 金属-绝缘体-半导体场效应管(MISFET)获得了创纪录的功率密度 $1.8 \text{ W/mm}@30 \text{ GHz}$ ^[3]。然而,无法避免的高密度界面态导致 InP MISFET 器件的电流-电压特性不够稳定,以至于很少投入使用。此后成功研制的 InP 高电子迁移率晶体管(HEMT)器件获得了 $1.45 \text{ W/mm}@30 \text{ GHz}$ 的微波功率密度,同时拥有出色的电流-电压特性^[4]。InP 器件的微波功率特性之所以优于 GaAs,主要在于 InP 具有略高的击穿电场强度与电子饱和速度,但是 InP 器件在微波大功率应用方面仍然不够理想^[5]。在工作频率达到 100 GHz 或更高时,InP 材料的优点能得到很好发挥(如图 1.1 所示),尤其在高速和低功耗模数混合集成电路方面具有很大优势。

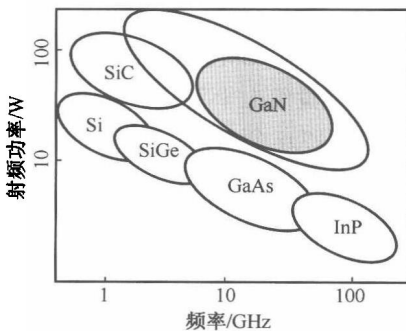


图 1.1 几种典型半导体的应用领域

为了满足无线通信、雷达等应用对高频率、宽带宽、高效率、大功率器件的需要,从二十世纪九十年代初开始,化合物半导体电子器件的研究重心开始转向宽禁带半导体器件^[6]。一般将禁带宽度大于 2 eV 的半导体称为宽禁带半导体。如表 1.1 所示,Baliga 优值是表征半导体材料高频大功率应用潜力的常用指标^[7],可见由于宽禁带半导体 GaN 和 SiC 等材料具有优越的材料特性,如大的禁带宽度、

高击穿场强、高电子饱和速度等,十分适合微波/毫米波大功率器件的应用。

研究表明,SiC MESFET 微波功率器件的截止频率 f_T 和最高振荡频率 f_{max} 都在 20 GHz 范围以内,所以 SiC MESFET 器件适合在 7 GHz 以下的频率范围内使用。在包括氮化镓(GaN)、氮化铝(AlN)、氮化铟(InN)及其合金材料的 III 族氮化物半导体材料中,除了禁带宽度较窄的 InN(约 0.7 eV),GaN 和 AlN 都是宽禁带半导体。GaN 电子器件主要以 GaN 异质结构 HEMT 为主,在 AlGaIn/GaN、InAlN/GaN 等氮化物异质结构界面形成的二维电子气(2DEG)具有很高的迁移率和极高的载流子面密度,所以 GaN HEMT 更适合于高频大功率应用。而且 GaN HEMT 结构可以在 SiC、金刚石等高热导率衬底上生长,从而具有极高的散热特性,同时也可以在价格低、工艺成熟、直径大的 Si 衬底上生长,具有低成本、高性能的优势。因此,GaN HEMT 已经被认为是当前最理想的微波功率器件。

III 族氮化物材料除了在高功率器件方面应用外,其禁带宽度范围可完全覆盖整个可见光谱,在传统半导体所无法制备的短波长光电子器件方面也具有广泛的应用。事实上,正是蓝光发光二极管(LED)的研究最早推动了 III 族氮化物半导体材料制备技术的进展。就 III 族氮化物半导体材料中技术水平最成熟的 GaN 而言,其晶体熔点高达 2300 °C,但其分解点在 900 °C 左右,所以制备 Si 材料的熔融方法并不适合用来制备 GaN 单晶。在体晶生长和异质外延薄膜两种制备方法中,薄膜异质外延技术首先取得了突破。依靠金属有机物化学气相淀积(MOCVD)和分子束外延(MBE)两种有效的材料生长方法可以获得高质量 GaN 外延薄膜材料。在二十世纪九十年代 GaN 蓝光 LED 技术迅速走向产业化时,GaN 电子器件也开始得到研究和

发展。

在 III 族氮化物电子器件研究的早期,经过 MESFET 和异质结场效应管(HFET)等各种器件结构的尝试,基于 AlGaIn/GaN 异质结构的 HFET 迅速成为 GaN 电子器件的主流结构。由于氮化物材料具有很强的自发和压电极化效应,未掺杂的 AlGaIn/GaN、InAlIn/GaN 等异质结中能形成高密度二维电子气,且二维电子气具有显著高于体电子的迁移率,以至于 GaN HFET 更常用的名称为 GaN 高电子迁移率晶体管(HEMT)。

二维电子气沟道的高导电特性结合 GaN 材料的高耐压能力,使得 GaN HEMT 成为微波功率器件研究中的热点。1993 年第一个 GaN HEMT 器件诞生^[8],3 年后 GaN HEMT 首次得到了微波功率特性^[9],随后输出功率密度从最初的 1.1 W/mm@2 GHz 提高到了 32.2 W/mm@4 GHz 和 30.6 W/mm@8 GHz^[10],2006 年又提高到 41.4 W/mm@4 GHz^[11]。GaN HEMT 单个器件在栅宽达 48 μm 时,实现了输出总功率 230 W@2 GHz^[12]。

氮化物电子器件能够实现这样快速的进展,首先是由于 AlGaIn/GaN 异质结电子材料的质量和 HEMT 器件的工艺技术水平不断提高;其次,为了实现大的输出功率,通常采用散热性能好的 SiC 衬底,以及对器件表面淀积钝化介质膜,来抑制与材料缺陷相关的电流崩塌现象,提高了器件的微波性能与可靠性。在异质结材料外延技术和器件工艺技术发展的同时,GaN 异质结构也在不断发展进步,出现了诸如在 AlGaIn/GaN 异质界面插入薄 AlN 插入层、在 AlGaIn 表面附加 GaN 帽层、在 GaN 沟道下方引入 AlGaIn 或 InGaIn 背势垒层等新的变化,以及对 HEMT 器件结构的优化,如引入槽栅、场板结构等。这些材料与器件结构、工艺的进步都对 GaN HEMT 器件性能的不断提高发挥了重要的推动作用。

除了输出功率密度和总功率,GaN HEMT 器件的工作频率、增益和功率附加效率等指标也在逐步提高,2011 年已报道截止频率达到 343 GHz^[13]和 W 波段输出功率密度达到 1.7 W/mm@95 GHz^[14]。在此过程中,为了实现氮化物技术与 Si 技术的融合,Si 衬底上的 GaN HEMT 也得到了快速的发展。GaN 基高速数字电路的需