



МИР электроники

А.И. Белоус, М.К. Мерданов,
С.В. Шведов

**СВЧ-электроника
в системах радиолокации
и связи.**

Техническая энциклопедия

В 2-х книгах

Книга 2

ТЕХНОСФЕРА
Москва
2016

УДК 621.38

ББК 32.85

Б43

Б43 Белоус А.И., Мерданов М. К., Шведов С.В.

СВЧ-электроника в системах радиолокации и связи.

Техническая энциклопедия

В 2-х книгах

Книга 2

Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2016. – 728 с. ISBN 978-5-94836-446-9

Впервые в отечественной научно-технической литературе в объеме одной книги детально рассмотрены теоретические основы, физические механизмы и принципы работы всех известных СВЧ-приборов и типовых устройств на их основе, методы расчета и конструирования, базовые технологические, схемотехнические и конструктивные особенности каждого класса СВЧ-приборов, а также наиболее распространенных технических решений радиоэлектронных систем на их основе от РЛС и телекоммуникационных устройств различного назначения до СВЧ-оружия наземного и космического применения.

Энциклопедия оформлена в двух книгах и содержит 17 глав.

В книге 1 последовательно рассматриваются следующие вопросы: теоретические основы радиолокации; основные этапы истории развития радиолокационной техники и СВЧ-радиосвязи; особенности построения систем цифровой обработки радиолокационных сигналов на микропроцессорных комплексах; радары подповерхностного зондирования; антенны и антенные устройства для радиолокации и связи; особенности процесса проектирования микросхем для РЛС; теоретические основы и типовые технические решения как полупроводниковой, так и вакуумной СВЧ-электроники; СВЧ-оружие наземного и космического назначения (включая СВЧ-комплексы по противодействию высокоточному оружию и использование СВЧ-импульсов в задачах защиты от этого оружия).

В книге 2 проведен анализ базовых технологий полупроводниковой СВЧ-электроники; рассмотрены специализированные полупроводниковые СВЧ-приборы для РЛС; ВЧ и СВЧ комплектующие компоненты для РЛС; методы и средства обеспечения надежности РЛС и систем связи; радиофотоника и ее приложения в радиолокационных и телекоммуникационных системах; особенности измерений и анализа СВЧ-устройств; методики измерения электрофизических параметров материалов СВЧ-электроники; радиационная стойкость СВЧ-устройств; особенности проектирования радиационно-стойкой элементной базы СВЧ-устройств (кремний-германиевые, КМОП и КНИ микросхемы).

Материалы энциклопедии содержат ссылки на 1216 основных и более 170 дополнительных использованных авторами источников информации. Данный труд также может служить универсальным справочным пособием для студентов, преподавателей, ученых и инженеров, специализирующихся в области СВЧ-электроники и ее многочисленных применений.

УДК 621.38

ББК 32.85

© 2016 Белоус А.И., Мерданов М. К., Шведов С.В.

© 2016, ЗАО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», оригинал-макет, оформление

ISBN 978-5-94836-446-9

Содержание

Глава 10. Базовые технологии полупроводниковой СВЧ-электроники	701
10.1. Состояние и тенденции развития зарубежных базовых технологий СВЧ-электроники	701
10.2. Состояние и тенденции развития технологий СВЧ-электроники в Российской Федерации	708
10.2.1. Анализ технического уровня отечественных СВЧ-приборов.....	708
10.2.2. Основные направления исследований и разработок в сфере деятельности технологической платформы	714
10.2.2.1. Направления развития отечественных СВЧ-приборов на период до 2020 г.....	714
10.2.2.2. Основные направления развития отечественных технологий изготовления СВЧ-приборов и устройств.....	722
10.3. Арсенид-галлиевые технологии изготовления СВЧ-приборов.....	725
10.3.1. Отечественные арсенид-галлиевые технологии изготовления маломощных транзисторов СВЧ- и КВ-диапазонов.....	727
10.3.2. Зарубежные арсенид-галлиевые фабрики	730
10.4. Технология мощных СВЧ-транзисторов и СВЧ МИС на основе нитрида галлия.....	734
10.4.1. Состояние и тенденции развития технологии мощных СВЧ-транзисторов и СВЧ МИС.....	734
10.4.2. Широкополосные транзисторные усилители мощности СВЧ-диапазона	744
10.5. Особенности технологий изготовления СВЧ-усилителей для радаров АФАР	755
10.5.1. GaN-усилители мощности для АФАР	755
10.5.2. СВЧ-усилители для АФАР на основе GaN-технологии компании Sumitomo	759
10.5.3. GaAs, GaN и «алмазные технологии» – перспективы развития СВЧ элементной базы АФАР	761
10.5.4. Технологические проблемы формирования подложек для эпитаксии гетероструктур	764
10.6. СВЧ-приложения МЭМС-технологий.....	768
10.6.1. Особенности реализации радиочастотных МЭМС/КМОП-устройств.....	768
10.6.2. Радиочастотные МЭМС-переключатели	774
10.6.3. Радиочастотные МЭМС-конденсаторы переменной емкости	778
10.6.4. Интегрированные МЭМС/КМОП-резонаторы	781
10.6.5. MEMS-технологии в задачах системной интеграции радиолокационных устройств.....	783
10.6.5.1. Типовые MEMS-изделия для СВЧ-устройств	783
10.6.5.2. Технологии микромонтажа СВЧ MEMS-приборов.....	789

10.7. Технологии корпусирования полупроводниковых СВЧ-приборов и МИС	792
10.7.1. Основные этапы создания отечественной технологии корпусирования СВЧ-приборов в НИИ «Пульсар»	792
10.7.2. Особенности технологии корпусирования мощных СВЧ-транзисторов	799
10.7.3. Особенности использования золота и алюминия в технологии сборки мощных СВЧ-транзисторов.....	811
10.7.4. Основы технологии сборки СВЧ-микросхем	818
Глава 11. Полупроводниковые СВЧ-приборы для РЛС	831
11.1. Элементная база приемопередающих модулей для фазированных антенных решеток	831
11.1.1. Агтенуаторы для приемопередающих модулей активных фазированных антенных решеток	831
11.1.2. Двухполюсные переключатели для АФАР.....	834
11.1.3. Фазовращатели для АФАР.....	835
11.1.4. Предусилители приемопередатчика для АФАР.....	837
11.1.5. Малошумящие усилители и усилители мощности для АФАР	837
11.1.6. Помехоподавляющие фильтры для АФАР.....	841
11.2. Отечественная элементная база СВЧ-приборов для РЛС	843
11.2.1. Отечественные GaAs активные элементы для приемопередающих СВЧ-модулей сантиметрового диапазона	843
11.2.2. СВЧ-приборы АО «Микроволновые системы».....	851
11.2.2.1. Широкополосные усилители мощности дециметрового диапазона на основе карбида кремния	851
11.2.2.2. Сверхширокополосные СВЧ-усилители мощности диапазона 6–18 ГГц	854
11.2.2.3. Технические параметры серии мощных и маломощных СВЧ-усилителей производства АО «Микроволновые системы»	858
11.3. Отечественные СВЧ-комплектующие на GaAs производства ЗАО «НПП «Планета-Аргалл»	863
11.3.1. Транзисторные усилители	863
11.3.2. Защитные устройства	865
11.3.3. СВЧ-транзисторы.....	867
11.4. Особенности проектирования частотно-избирательных микросхем на ПАВ	870
11.5. Радиоприемные СВЧ-устройства производства НПП «Пульсар»	877
11.6. Высокоскоростные аналого-цифровые преобразователи для РЛС	885
11.7. Зарубежные микросхемы для приемопередающих модулей РЛС на основе нитрида галлия.....	889

11.7.1. Приемопередающие модули АФАР на основе GaN.....	889
11.7.2. Монолитные GaN СВЧ-усилители мощности.....	891
11.7.3. СВЧ-микросхемы переключателей на основе GaN.....	893
11.7.4. Оптимизация конструкции GaN СВЧ-транзисторов	895
11.7.5. СВЧ-микросхемы компании RFHIC	896
11.7.5.1. СВЧ-микросхемы на GaN для систем беспроводной связи.....	896
11.7.5.2. GaN-усилители для импульсных РЛС.....	899
11.8. ВЧ- и СВЧ-приборы компании Mini-Circuits.....	902
11.8.1. Интегрированные монолитные усилители группы VNA.....	902
11.8.2. Двойные балансные смесители группы MSA1	904
11.8.3. Серия универсальных высокочастотных усилителей	906
11.8.4. Смесители частот.....	907
11.8.5. Аттенюаторы ВЧ- и СВЧ-диапазонов	909
11.9. СВЧ-микросхемы компании Hittite Microwave.....	910
11.9.1. СВЧ-микросхемы аттенюаторов компании Hittite Microwave.....	910
11.9.1.1. Типовые микросхемы аттенюаторов с аналоговым управлением	914
11.9.1.2. Микросхемы аттенюаторов с цифровым управлением	916
11.9.1.3. СВЧ и сверхширокополосные усилители с фиксированным усилением	918
11.9.2. Монолитные СВЧ-микросхемы полных синтезаторов частоты компании Hittite Microwave	931
11.9.2.1. Монолитные микросхемы PLL СВЧ-синтезаторов.....	931
11.9.2.2. Трехдиапазонные монолитные микросхемы синтезаторов.....	933
11.9.2.3. Широкодиапазонные монолитные микросхемы синтезаторов.....	936
11.9.2.4. Микросхемы НМС983 и НМС984 для построения сверхширокополосных синтезаторов.....	940
11.9.2.5. Монолитные микросхемы широкодиапазонных синтезаторов НМС701/702/703	946
11.9.2.6. Программное обеспечение монолитных микросхем синтезаторов.....	950
11.10. Особенности выбора элементной базы для систем вторичного электропитания приемопередающих модулей АФАР.....	955
11.10.1. Принципы построения системы электропитания для ППМ АФАР.....	955
11.10.2. Технологические особенности изготовления DC/DC преобразователей	958
11.10.3. Особенности преобразователей SynQor серии Hi-Rel	961
11.10.4. Электромагнитные процессы в системе питания ППМ АФАР	964

Глава 12. ВЧ и СВЧ комплектующие компоненты для РЛС	972
12.1. Микрополосковые фильтры для СВЧ-систем.....	972
12.2. Особенности применения СВЧ-фильтров на акустических волнах	975
12.3. Особенности использования специальных конструктивных решений кабельных гермовводов для СВЧ-устройств.....	979
12.4. Отечественные мощные полосковые СВЧ-резисторы	983
12.5. Высокочастотные соединения для активных фазированных антенных решеток	986
12.6. ВЧ- и СВЧ-комплектующие компании Spectrum Advanced Specialty Products	992
12.7. Керамические СВЧ-компоненты для РЛС.....	1008
12.7.1. Керамические конденсаторы.....	1008
12.8. Сетевые фильтры и пленочные конденсаторы для РЛС.....	1011
12.9. Специальные соединители и кабельные сборки.....	1014
12.10. Эволюция корпусов для устройств и блоков РЭА.....	1016
 Глава 13. Методы и средства обеспечения надежности радиолокационных систем и систем связи	1020
13.1. Электромагнитная совместимость: термины, определения, классификация	1020
13.1.1. Природа электромагнитных помех.....	1020
13.1.2. Термины, определения, классификация ЭМС	1025
13.1.3. Нормы и стандарты электромагнитной совместимости.....	1028
13.2. Обеспечение электромагнитной совместимости микропроцессорных блоков управления РЛС	1039
13.2.1. Особенности проектирования печатных плат, оптимизированных по электромагнитной совместимости	1039
13.2.2. Измерение уровня помех, излучаемых микроконтроллерами.....	1045
13.2.3. Обеспечение электромагнитной совместимости в проводных системах связи	1054
13.2.4. Проектирование печатных плат для высокоскоростных систем связи	1057
13.3. Защитные СВЧ-устройства для РЛС и систем связи	1069
13.3.1. Классификация и особенности создания защитных СВЧ-устройств для радиолокации и связи	1069
13.3.2. Газоразрядные защитные устройства.....	1071
13.3.3. Полупроводниковые защитные устройства	1072
13.3.4. Вакуумные защитные устройства	1079
13.4. Особенности оценки ресурса СВЧ-устройств с учетом надежности механических составных частей.....	1081
13.5. Особенности организации цепей электропитания СВЧ-устройств РЛС.....	1087
13.6. ВЧ- и СВЧ-компоненты для подавления электромагнитных помех	1095

13.7. Особенности оценки ресурса СВЧ-устройств с учетом надежности механических частей	1102
13.8. Стандартные методы испытаний СВЧ-устройств на устойчивость к электростатическим разрядам	1109
13.8.1. Стандарты испытания на уровне устройства	1110
13.8.1.1. Модель человеческого тела	1110
13.8.1.2. Машинная модель	1111
13.8.1.3. Модель заряженного устройства	1112
13.8.2. Сравнение методов испытаний на уровне устройства	1113
13.8.3. Стандарты испытаний на системном уровне	1114
13.8.3.1. Устойчивость к электростатическому разряду	1114
13.8.3.2. Устойчивость к быстрому переходному процессу	1115
13.8.3.3. Устойчивость к всплескам напряжения	1117
13.9. Пассивная интермодуляция в СВЧ-цепях	1118
13.9.1. Механизмы возникновения пассивной интермодуляции	1119
13.9.2. Причины появления пассивной интермодуляции и методы снижения ее уровня в радиочастотных соединителях	1120
13.9.3. ПИМ в материале печатной платы	1121
13.9.4. ПИМ в полосковых, коаксиальных и волноводных линиях передачи	1122
13.9.5. ПИМ в направленных ответвителях, частотных дуплексерах и трансформаторах	1122
13.9.6. Внешние источники ПИМ	1123
13.9.7. Способы оценки уровня ПИМ	1124
13.9.8. Специализированная аппаратура для тестирования ПИМ	1127
Глава 14. Радиофотоника в телекоммуникационных и радиолокационных системах	1135
14.1. Фотонные устройства на основе поверхностно излучающих лазеров с вертикальным резонатором	1135
14.2. Конструкция длинноволнового поверхностно излучающего лазера сплавной конструкции	1138
14.3. Основные технические характеристики длинноволнового поверхностно излучающего лазера сплавной конструкции	1140
14.3.1. Электрические и энергетические характеристики	1140
14.3.2. Малосигнальные частотно-модуляционные характеристики	1141
14.3.3. Шумовые характеристики	1141
14.3.4. Линейность в режиме большого сигнала	1142
14.3.5. Спектральные и перестроечные характеристики	1143
14.4. Лазеры непрерывной генерации: VECSEL, MEMS-VCSEL, LICSEL	1145
14.5. Лазеры импульсной генерации: VECSEL-SESAM, MIXSEL	1156
14.6. Основные направления фундаментальных исследований в области компонентной базы радиофотоники и функциональных устройств на ее основе	1159

14.7. Примеры применения радиофотонных устройств в радиолокации.....	1161
14.7.1. Активные линии задержки.....	1161
14.7.2. Каналы передачи СВЧ-сигналов на большие расстояния.....	1163
14.7.3. Системы распределения радиосигналов по полотну АФАР РЛС	1165
14.7.4. Измерительно-калибровочные средства для РЛС	1167
14.8. СВЧ-фотодетекторы для систем радиофотоники, радиолокации и оптоволоконной связи	1169
14.8.1. Физические принципы работы СВЧ p-i-n-фотодетекторов.....	1169
14.8.2. Физические механизмы ограничения фототока p-i-n-фотодиода	1174
14.8.3. Конструктивные решения фотодиодов	1177
14.8.3.1. Фотодиод с двойной обедненной областью (DDR)	1177
14.8.3.2. Фотодиод с частично обедненным поглощающим слоем (PDA).....	1177
14.8.3.3. Униполярный гетерофотодиод (UTC).....	1178
Глава 15. Измерения и анализ СВЧ-устройств.....	1187
15.1. Особенности измерений и анализа цепей в миллиметровом диапазоне волн	1187
15.2. Инструментальный анализ СВЧ-цепей в миллиметровом диапазоне волн (задачи, методы, средства).....	1190
15.2.1. Измеряемые «цепные» параметры СВЧ-устройств	1190
15.2.2. Измерительные задачи анализа СВЧ-цепей	1192
15.2.3. Некоторые общие требования к измерителям параметров цепей миллиметрового диапазона волн	1195
15.3. Ретроспективный анализ методов и средств измерений параметров СВЧ-цепей.....	1196
15.3.1. Зондовые методы.....	1196
15.3.1.1. Методы измерений на основе измерительной волноводной линии.....	1196
15.3.1.2. Анализ погрешностей измерительной линии	1199
15.3.1.3. Измерительная линия с качанием частоты.....	1201
15.3.1.4. Многозондовые измерительные линии. Метод четырех зондов.....	1202
15.3.1.5. Параметры серийных измерительных линий миллиметровых волн.....	1205
15.4. Рефлектометрические методы измерений параметров СВЧ-цепей. Рефлектометры	1207
15.5. Тенденции дальнейшего развития и новые области применения векторных анализаторов цепей.....	1207
15.5.1. Основные тенденции развития ВАЦ	1207
15.5.2. Новые частотные диапазоны и измерительные среды	1208
15.6. Повышение точностных характеристик ВАЦ и дальнейшее совершенствование методов и средств их метрологического обеспечения	1212

15.7. Расширение функциональных возможностей, применение анализаторов цепей для измерений параметров активных и нелинейных СВЧ-устройств	1215
15.7.1. Частотно-временные преобразования	1215
15.7.2. Модуляционный векторный анализ цепей	1215
15.7.3. Особенности измерений параметров нелинейных СВЧ-цепей.....	1217
15.8. Автоматизированные аппаратные средства для измерений параметров интегральных схем на полупроводниковых пластинах в миллиметровом диапазоне волн.....	1218
15.8.1. Тестирование СВЧ интегральных схем на полупроводниковых пластинах	1218
15.8.2. Копланарные пробники	1220
15.8.3. Автоматизированные комплексы тестирования ИС на полупроводниковых пластинах.....	1222
15.8.4. Особенности калибровки измерительных систем при тестировании ИС на полупроводниковых пластинах	1227
15.8.5. О преимуществах РЧ- и микроволнового тестирования ИС на полупроводниковых пластинах.....	1228
15.9. Векторные анализаторы цепей миллиметровых волн. Классификация и принципы построения	1229
15.9.1. Типы и классификация векторных анализаторов цепей	1229
15.9.2. Гетеродинные ВАЦ.....	1232
15.9.3. Гомодинные ВАЦ. Методы измерений в зависимости от модуляции опорного и измерительного сигналов.....	1234
15.9.4. Схема с амплитудной модуляцией в измерительном канале.....	1235
15.9.4.1. Метод Шафера–Кона	1235
15.9.4.2. Измерительный тракт гомодинного ВАЦ с модуляцией измерительного сигнала	1236
15.9.4.3. Схемы с линейной фазовой модуляцией и фазовой манипуляцией измерительного сигнала	1238
15.9.4.4. Схема с модуляцией опорного сигнала	1240
15.10. Гомодинные схемы с одновременной модуляцией измерительного и опорного сигналов	1241
15.11. Структурные схемы автоматических анализаторов цепей гомодинного типа.....	1245
15.11.1. Структурные схемы анализаторов цепей с четырнадцатиполюсным измерительным СВЧ-трактом	1245
15.11.2. Структурная схема анализатора цепей с десятиполюсным измерительным СВЧ-трактом	1248
15.11.3. Структурная схема ВАЦ с восьмиполюсным измерительным СВЧ-трактом	1250
15.12. Анализаторы цепей компании Keysight	1251
15.12.1. Анализаторы цепей серии PNA-X	1251

15.12.2. Особенности проведения испытаний усилителей анализаторами цепей PNA-X.....	1258
15.12.3. Особенности тестирования нелинейных устройств анализаторами цепей PNA-X.....	1259
15.12.4. Средства калибровки анализаторов цепей	1265
15.12.5. Измерительные системы на основе анализаторов цепей.....	1266
15.12.6. Анализаторы цепей PNA-L	1269
15.12.7. Анализаторы цепей серии PNA	1270
15.12.8. Нелинейные векторные анализаторы цепей (NVNA)	1273
15.12.9. Генератор сигналов Keysight UXG.....	1276

Глава 16. Измерение электрофизических параметров диэлектрических и полупроводниковых материалов и структур СВЧ-электроники..... 1283

16.1. Анализ современного состояния исследований в области технологий контроля параметров диэлектрических и проводящих материалов на СВЧ.....	1283
16.1.1. Особенности использования СВЧ-методов измерений в полупроводниковой СВЧ-электронике.....	1283
16.1.2. Измерение электрофизических параметров материалов волноводными методами	1286
16.1.3. Измерение параметров полупроводников мостовыми методами.....	1289
16.1.4. Измерение параметров полупроводников резонаторными методами.....	1291
16.1.5. Измерение параметров материалов методом волноводно-диэлектрического резонанса	1295
16.1.6. Измерение параметров материалов и структур автодинными методами.....	1297
16.1.7. Измерение параметров материалов с использованием синхронизированных генераторов	1298
16.1.8. Ближнеполевая СВЧ-микроскопия свойств материалов	1299
16.1.9. Измерения толщины нанометровых слоев металла и электропроводности полупроводника в структурах металл – полупроводник по спектрам отражения и прохождения электромагнитного излучения.....	1303
16.2. Математическая модель и результаты компьютерного моделирования взаимодействия электромагнитного излучения СВЧ-диапазона с одномерными волноводными фотонными структурами, включающими нанометровые металлические, диэлектрические и полупроводниковые слои.....	1305
16.2.1. Взаимодействие СВЧ-излучения с многослойными структурами с плоскостями слоев, перпендикулярных направлению распространения излучения	1305
16.2.1.1. Математическая модель	1306

16.2.1.2. Результаты компьютерного моделирования спектров отражения волноводных фотонных структур в различных диапазонах частот	1308
16.2.1.3. Результаты компьютерного моделирования зависимости спектров отражения волноводных фотонных структур от положения «нарушения» периодичности в структуре фотонного кристалла.....	1313
16.2.1.4. Результаты компьютерного моделирования зависимости спектров отражения волноводных фотонных структур от параметров нарушения	1315
16.2.1.5. Результаты компьютерного моделирования спектров отражения волноводных фотонных структур, содержащих проводящие слои	1318
16.3. Теоретическое обоснование метода измерения параметров материалов СВЧ с использованием одномерных волноводных фотонных структур	1322
16.3.1. Измерение диэлектрической проницаемости материалов.....	1322
16.3.2. Измерение комплексной диэлектрической проницаемости материалов с потерями.....	1325
16.3.3. Измерение толщин нанометровых металлических пленок на диэлектрических или полупроводниковых подложках	1328
16.4. Результаты экспериментального исследования взаимодействия СВЧ-излучения с одномерными волноводными фотонными структурами	1332
16.4.1. Результаты экспериментального исследования спектров отражения и прохождения волноводных фотонных кристаллов	1332
16.4.2. Использование волноводных фотонных структур для измерения параметров нанометровых металлических слоев на полупроводниковых и диэлектрических подложках.....	1334
16.4.2.1. Экспериментальное исследование частотных зависимостей коэффициента отражения фотонных структур, содержащих нанометровые металлические слои.....	1334
16.4.2.2. Измерение электропроводности металлических пленок, нанесенных на диэлектрические подложки	1336
16.4.2.3. Измерение толщин металлических пленок, нанесенных на полупроводниковые подложки	1338
16.4.2.4. Измерения толщины нанометровых слоев металла и электропроводности полупроводника в структурах металл – полупроводник	1341
16.4.3. Использование волноводных фотонных структур для измерения параметров диэлектрических материалов.....	1343

16.4.3.1. Экспериментальное исследование частотных зависимостей коэффициента отражения фотонных структур, содержащих неоднородности в виде диэлектрических слоев.....	1343
16.4.3.2. Измерение диэлектрической проницаемости материалов с низкими потерями	1345
16.4.3.3. Измерение действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости материалов с потерями.....	1348
Глава 17. Радиационная стойкость СВЧ-устройств	1371
17.1. Влияние ионизирующих излучений на характеристики кремний-германиевых интегральных схем СВЧ-диапазона	1371
17.1.1. Гетероструктурные биполярные транзисторы.....	1372
17.1.2. Микросхемы СВЧ МШУ И ШПУ	1374
17.1.3. Микросхемы СВЧ ГУН.....	1378
17.2. Особенности проектирования радиационно-стойкой библиотеки проектирования СВЧ функциональных блоков на базе КМОП КНИ-технологии	1383
17.2.1. Высокочастотные и шумовые свойства отечественных КНИ МОП-транзисторов	1385
17.2.2. Приборное моделирование КНИ МОП-транзистора	1385
17.2.3. МОП-варикапы	1389
17.2.4. R, C, L элементы.....	1391
17.2.5. Разработка функциональных блоков СВЧ-тракта.....	1393
17.3. Особенности механизмов воздействия факторов космического пространства на образование локальных радиационных эффектов.....	1398
17.4. Особенности проектирования пассивных элементов для радиационно-стойких монолитных кремний-германиевых СВЧ ИС.....	1405
17.4.1. Микрополосковая линия передачи	1405
17.4.2. Интегральные индуктивности	1407
17.4.3. Симметрирующие трансформаторы.....	1409

ГЛАВА 10

БАЗОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКИ

10.1. Состояние и тенденции развития зарубежных базовых технологий СВЧ-электроники

Современные изделия СВЧ-электроники включают широкий спектр различных классов приборов, отличающихся по назначению, физическому принципу действия, конструкции и технологии изготовления. Это электровакуумные приборы СВЧ – ЭВП СВЧ (магнетроны, усилители М-типа, лампы бегущей и обратной волны, клистроны, клистроды, гироприборы); твердотельные приборы СВЧ в дискретном, монолитном, гибридном и гибридно-монолитном исполнении (СВЧ-транзисторы и диоды, малошумящие СВЧ усилители, усилители СВЧ-мощности, генераторы, синтезаторы частот, фазовращатели, аттенюаторы, переключатели, модуляторы, преобразователи частот (умножители, делители, смесители), модули СВЧ (приемные, передающие, приемопередающие); ферритовые приборы СВЧ (вентили, фазовращатели, фильтры, циркуляторы и пр.); комплексированные изделия СВЧ (электровакуумные, твердотельные и вакуумно-твердотельные, с применением в своем составе ЭВП СВЧ, твердотельных дискретных приборов и модулей СВЧ, ферритовых приборов СВЧ, изделий силовой и микроэлектроники). Отдельным сегментом мирового рынка являются законченные радиоэлектронные устройства, функционирующие в СВЧ- и КВЧ-диапазонах.

Развитие базовых СВЧ-технологий обусловлено прежде всего развитием радиоэлектронных устройств как конечного продукта, предлагаемого потребителям. Именно радиоэлектроника является движущей силой и задает темп развития и требуемые технические характеристики СВЧ-приборов и устройств, поскольку основные ТТХ радиоэлектронной аппаратуры различного функционального предназначения (требуемые дальность, точность определения целей и т.д.) пересчитываются по известным соотношениям в электрические параметры СВЧ-приборов и устройств (выходная мощность, коэффициент шума, полоса частот и пр.). Для реализации требуемых характеристик РЭА и, соответственно, требуемых электрических и эксплуатационных характеристик СВЧ-приборов и устройств разрабатываются новые конструкции, материалы и технологии СВЧ-электроники, а не наоборот.

За рубежом (США, Англия, Франция, Япония, Германия и др.) при сохранении общего потенциала СВЧ-электроники в последние годы особенно бурное развитие получила твердотельная СВЧ-электроника и мощные вакуумные СВЧ-приборы миллиметрового и терагерцового диапазона.

Так, в гл. 8 показано, что в США в результате реализации программ MIMIC, MASFET и др. технология МИС СВЧ с длиной затвора 0,25 мкм (для МИС, работающих на частотах до 30–40 ГГц) стала стандартом, многие фирмы освоили технологии 0,1–0,15 мкм для МИС миллиметрового диапазона. Промышленные сверхширокополосные монолитные усилители достигли коэффициента шума менее 3 дБ в полосе 2–18 ГГц, выпускаются широкополосные монолитные усилители с частотами до 100 ГГц, созданы монолитные усилители мощности с выходной мощностью до 5 Вт с кристалла в полосе 6–18 ГГц и КПД до 60%, гибридные вакуумно-твердотельные усилители с удельной мощностью свыше 80–100 Вт/кг в полосе 6–18 ГГц и КПД 25–40%. Освоен выпуск многофункциональных МИС с площадью 20–40 мм² при выходе годных 50–75%. Многими фирмами освоена технология выпуска МИС на базе гетероструктурных биполярных транзисторов, обеспечивающих 1,5–2-кратное увеличение КПД и удельной мощности широкополосных МИС. Промышленно выпускаются псевдоморфные гетероструктурные полевые транзисторы с мощностью до 1,5 Вт на частоте 18 ГГц при КПД 50% и усилении 9,5 дБ.

Заканчивается переход на серийный выпуск пластин арсенида галлия диаметром 150–200 мм. Практически стандартизованы системы САПР МИС СВЧ, включающие средства объемного электродинамического моделирования, нелинейного анализа и подготовки шаблонов, реализованные на мощных рабочих станциях.

В результате реализации ряда программ в США и в Европе по созданию бортовых РЛС с АФАР (URR – Ultra Reliable Radar, AMSAR – Airborne Multirole multifunction Solid-state Active array Radar, GTAR – GAC Thomson Airborn Radar, HDMP – High Density Microwave Packaging Program, AVIP – «интеграция авионики» и др.) в рамках проектов F-22, YF-23, JSF проведен комплекс работ по созданию технологий и разработке Т/Р СВЧ приемопередающих модулей для АФАР высокой плотности компоновки с применением керамики высокотемпературного (НТСС) и низкотемпературного (ЛТСС) обжига для создания многослойных плат, согласования, разводки и компоновки пассивных и активных (МИС) элементов СВЧ-схем. В своей основе АФАР состоит из сотен, иногда тысяч (в зависимости от задач) отдельных приемопередающих элементов, выполненных в виде приемопередающих Т/Р-модулей. Управление данными, получаемыми от такого большого количества элементов, оказалось возможным благодаря большим вычислительным мощностям, которые стали доступны при небольших габаритах бортовых вычислителей. Поскольку стоимость самой антенны составляет около 52% от стоимости всей РЛС, фирмы-разработчики делают основные инвестиции именно в технологию изготовления Т/Р-модулей.

Начиная с 1994 г. толщина Т/Р-модулей фирмы Raytheon (США) уменьшилась на 90% и на 2015 г. составляет 8 мм, масса снизилась на 83%, а стоимость упала на 82%. Это обусловлено архитектурными изменениями в Т/Р-модуле, а также автоматизированной сборкой и испытаниями, которые сократили время производства.

Снижение стоимости является мощным стимулом применения новой технологии HDMP. Динамика снижения стоимости модуля такова, что при стоимости в начале 1990-х гг. приблизительно несколько тысяч долларов, сегодня стоимость Т/Р-модуля находится в пределах 600–800 долл. и продолжает снижаться и через несколько лет снизится до порога в 200 долл. за модуль, после которого усовер-

шенствования, по оценкам некоторых специалистов в аэрокосмической области, будут дороже ожидаемой экономии.

Основные материалы, используемые сегодня для чипов интегральных схем СВЧ, — кремний (для низкочастотных), арсенид галлия (для высокочастотных), фосфид индия, нитрид галлия (для МИС миллиметровых диапазонов), кремний-германий (для низкочастотных МИС, включающих в свой состав схемы цифрового управления и обработки). При этом в количественном соотношении наиболее массовыми являются СВЧ-приборы на основе арсенида галлия. В самой емкой рыночной нише (усилители мощности сотовых телефонов) им принадлежит 80% всего мирового рынка. Причем когда сегодня говорят о GaAs, имеют в виду прежде всего гетероструктуры — AlGaAs/GaAs, InGaAs/GaAs и т.д. — и созданные на их базе транзисторы — биполярные и полевые с барьером Шоттки (HEMT). Арсенид галлия традиционно рассматривался как основной материал для СВЧ-приборов. Подвижность электронов ($8500 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$), ширина запрещенной зоны и напряженность поля пробоя ($1,42 \text{ эВ}$ и $4 \cdot 10^5 \text{ В/см}$ соответственно) делают GaAs предпочтительнее кремния в области СВЧ. Это был первый освоенный промышленностью материал из группы полупроводников $A^{III}B^V$, с которыми и сегодня связаны многие перспективы СВЧ-электроники.

Более 95% рынка монокристаллов GaAs составляют два типа материалов, приблизительно одинаковые по объему производства: полуизолирующий (ПИ) GaAs с удельным электросопротивлением $> 10^7 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, используемый при производстве СВЧ ИС и дискретных приборов, и сильно легированный кремнием ($10^{17} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$) GaAs с низкой плотностью дислокаций, применяемый при изготовлении СД и лазеров.

Несмотря на опережающий рост эпитаксиальных технологий, основным методом изготовления активных слоев СВЧ-приборов пока остается ионная имплантация непосредственно в подложку GaAs. Именно эта технология задает основные требования к ПИ материалу: высокое удельное сопротивление, обеспечивающее надежную изоляцию активных областей ($> 10^7 \text{ Ом}\cdot\text{см}$); низкое содержание фоновых примесей, присутствие которых может снижать концентрацию носителей заряда в активном слое; высокая однородность распределения электрофизических параметров по поперечному сечению слитка, выращенного в кристаллографическом направлении.

В объемном материале удовлетворить этим требованиям трудно, поэтому была предложена технология создания буферных слоев, при использовании которой на полуизолирующей подложке выращивается относительно толстый эпитаксиальный слой с высоким удельным сопротивлением. Активный слой создается либо дальнейшим эпитаксиальным наращиванием, либо методом ионной имплантации в буферном слое. Данная методика позволяет маскировать нежелательные свойства подложки, но при этом усложняется процесс и увеличивается стоимость изготовления. Практической целью исследований полуизолирующего GaAs является возможность образования активного слоя непосредственно на подложке, удовлетворяющего всем требованиям.

Помимо этого, экономические соображения производства ИС требуют использования пластин большой площади. Поэтому в середине 1990-х гг. в мировом производстве произошел переход на использование пластин ПИ GaAs диаметром 100 мм, а с конца 1990-х гг. начался переход на использование пластин диаметром 150–200 мм. Кристаллы такого диаметра производятся с использованием промышленных технологий.

Материалы группы GaN со своими уникальными характеристиками — это серьезное научно-техническое завоевание конца XX — начала XXI в., которое, помимо оптоэлектронных приборов (светодиодов, лазеров, ультрафиолетовых фотоприемников), открыло потенциальные возможности для создания высокочастотных, высокоомощных и высокотемпературных электронных приборов. Речь идет прежде всего о полевых транзисторах на AlGaN/GaN.

Транзисторы на нитриде галлия, созданные впервые в 1993 году, существенно расширили возможности приборов СВЧ-диапазона. Эти приборы способны работать в значительно более широком диапазоне частот и при более высоких температурах, а также с большей выходной мощностью по сравнению с приборами на кремнии, арсениде галлия, карбиде кремния или на любом другом освоенном в производстве полупроводниковом материале. Максимальная ширина запрещенной зоны обуславливает возможность работы транзистора при высоких уровнях активирующих воздействий (температуры, радиации). Очень высокая концентрация электронов в области двумерного электронного газа в сочетании с приемлемой подвижностью электронов дает возможность реализации большой плотности тока в сечении канала транзистора и высокого коэффициента усиления. Максимальная критическая напряженность электрического поля в сочетании с высокой плотностью тока обеспечивает удельную выходную мощность промышленных GaN-транзисторов, на порядок превышающую удельную выходную мощность арсенид-галлиевых транзисторов. По сравнению с серийно выпускаемыми GaAs МИС новые изделия на основе GaN-транзисторов имеют в 2–10 раз большую выходную мощность и сравнимый либо больший КПД при одинаковых или меньших размерах кристалла. Номенклатура выпускаемых GaN усилительных МИС пока в десятки (если не в сотни) раз меньше, чем GaAs МИС, однако фаза промышленного освоения этой технологии только началась и в ближайшие годы предложения на этом рынке должны резко расширяться. Проблемными моментами, сдерживающими развитие GaN-приборов, являются задача обеспечения адекватного теплоотвода от активной структуры и необходимость выращивания эпитаксиальных структур GaN на чужеродных (отличающихся по параметрам кристаллической решетки, тепловому расширению и т.д.) подложках из-за невозможности реализации высокоомной подложки собственно GaN.

Все перечисленные характеристики GaN-приборов были достигнуты главным образом благодаря большому объему работ по исследованию и совершенствованию эпитаксиальных структур на подложках из сапфира, SiC, Si (111), выращиваемых методами осаждения из паровой фазы металлоорганических соединений (MOCVD), молекулярно-лучевой эпитаксии (MBE) и хлоридно-гидридной эпитаксии (HVPE). Однако, несмотря на впечатляющие результаты, достигнутые к настоящему времени, технология формирования исходных эпитаксиальных структур AlGaN/GaN на подложках сапфира, SiC и Si (111) методами гетероэпитаксии еще далека от совершенства. Структуры, выращенные методами MOCVD, MBE и HVPE, имеют большую плотность дефектов (10^6 – 10^9 см⁻²). Правда, дефекты в этих материалах в силу своей природы значительно слабее влияют на параметры, чем дефекты в полупроводниковых соединениях типа A^{III}B^V (GaAs, InP, GaP), традиционно используемых для изготовления СВЧ-приборов. Но присутствие дефектов сказыва-

вается на долговременной работе, особенно в условиях высоких напряжений и повышенных температур. Совершенствование технологии GaN-транзисторов и улучшение качества исходных эпитаксиальных структур позволили достигнуть в последние годы новых рекордов по максимальной крутизне прибора, по граничной и максимальной частотам, а также по удельной плотности тока канала. Однако высокая плотность дефектов не позволяет производить надежные изделия с большой площадью поверхности кристалла. Поэтому достигнутые рекордные значения удельной отдаваемой мощности 10–30 Вт/мм следует рассматривать скорее как демонстрацию принципиальных возможностей материала.

Создание любого качественного полупроводникового изделия начинается с монокристаллической пластины, используемой в качестве подложки для дальнейшего наращивания приборной структуры. Структурное качество и однородность свойств подложечного материала определяет как параметры отдельного прибора, так и процент выхода годных приборов с пластины в целом. Как правило, для того чтобы выращивать структуры с минимальным содержанием дислокаций несоответствия, используются подложки того же материала, что и наращиваемые эпитаксиальные слои, т.е. для соблюдения правила минимального рассогласования периодов решетки. Отсюда возникает проблема получения высококачественных однородных, в том числе полуизолирующих монокристаллических подложек, которые используются в многочисленных приборах и устройствах как СВЧ-электроники, так и оптоэлектроники, вычислительной и лазерной техники, силовой электроники, электроэнергетики, микро- и нанoeлектроники. Актуальным остается вопрос получения подложек с высокими значениями удельного сопротивления, подвижности, макро- и микрооднородностью распределения свойств по пластине. К приборам, работающим в условиях жесткой радиации, к этим требованиям добавляется еще требование по радиационной стойкости изделия.

Радиационное модифицирование полупроводниковых материалов, т.е. направленное изменение их свойств воздействием быстрых электронов, гамма-квантов, нейтронов, протонов, альфа-частиц, является одним из наиболее перспективных и бурно развивающихся в последние годы физико-технологических методов. Контролируемое введение как легирующих примесей, так и дефектов в полупроводниковые материалы радиационными методами в сочетании с последующими термическими обработками позволяет в широких пределах изменять их электрофизические, оптические, структурные характеристики. Одним из основных методов, позволяющих получать полупроводниковые материалы с высокой однородностью распределения примеси по объему и, соответственно, свойств, является метод ядерного легирования.

В последние годы в мире активно ведутся работы по созданию СВЧ полупроводниковых приборов и устройств на основе алмазных структур, обладающих уникальными теплопроводными свойствами и радиационной стойкостью. Преодоление ряда технологических трудностей, связанных с физикой работы этих структур и их обработкой, позволяет с уверенностью заявлять об их скором появлении в составе радиоэлектронной аппаратуры.

Наряду с разработкой активной СВЧ электронной компонентной базы, включающей создание базовых технологий производства транзисторов и моно-

литных сверхвысокочастотных микросхем на основе гетероструктур материалов группы A_3B_5 , приемопередающих сверхвысокочастотных субмодулей L-, S-, C- и X-диапазона, многофункциональных сверхвысокочастотных интегральных схем на основе нитридных гетероэпитаксиальных структур, гетероструктур «кремний – германий» и т.д., неотъемлемой частью и важным направлением развития СВЧ-электроники является СВЧ пассивные электронные компоненты (СВЧ ПЭК).

В состав СВЧ ПЭК входят: СВЧ-резисторы, поглотители, аттенуаторы, делители мощности, СВЧ-конденсаторы, СВЧ-индуктивности, СВЧ акустоэлектронные компоненты (СВЧ АЭК) и др.

Основными системами, в которых возможно применение СВЧ ПЭК на частотах от нескольких мегагерц до 20 ГГц, являются следующие: AMPS, глобальная система связи с подвижными объектами (GSM), NMT 450–900 МГц, DECT, системы многостанционного доступа с кодовым разделением каналов (CDMA), цифровая сотовая связь (DCS), персональная радиотелефонная связь (PCN), беспроводная локальная вычислительная сеть (Wireless LAN), сотовые базовые станции (cellular mobile base stations) и абонентские подвижные радиостанции (private mobile radios): TETRA, PMR, UMTS.

Из всего многообразия СВЧ ПЭК наиболее выгодно отличаются по функциональным возможностям акустоэлектронные компоненты (АЭК). На их основе традиционно во всем мире изготавливаются элементы для радиотехнических систем, мобильной и сотовой связи и т.д. (фильтры, резонаторы, линии задержки и др.).

Этим можно объяснить наиболее высокий уровень их промышленного производства – более 15 млрд долл. США в 2011 г. Ежегодно разрабатывается свыше тысячи типонаименований акустоэлектронных устройств на поверхностных акустических волнах (ПАВ) с объемом производства более 1000 млн в год. В мире более 60 компаний имеют дело с изготовлением либо использованием устройств на ПАВ. В основном предел рабочих частот АЭК на ПАВ ограничивается значением 2 ГГц, что связано с технологическими пределами применимости фотолитографических процессов при изготовлении встречно-штыревых преобразователей, являющимися основными элементами для приема и возбуждения ПАВ в пьезокристаллической подложке. Повышение рабочих частот (до 20 ГГц) СВЧ АЭК связано с разработкой акустоэлектронных компонентов нового поколения, работающих на нетрадиционных типах акустических волн (вытекающие акустические волны, объемные акустические волны (ОАВ) в тонкопленочных пьезоструктурах (AlN, GaN, ZnO и т.д.), а также на новых видах пьезоакустических материалов.

Анализ направлений разработок ведущих мировых производителей СВЧ пассивных электронных компонентов, таких как Honeywell, Michelin, Texas Instruments Transense, Motorola, Murata, RFSAW, Fujitsu, Vishay, Epcos и др., позволяет выявить основные тенденции и перспективы развития рынка СВЧ пассивных электронных компонентов.

Главными из них являются:

- снижение габаритных размеров;
- выпуск практически всей номенклатуры в чип-исполнении для поверхностного монтажа;
- расширение диапазона рабочих частот;

- повышение стабильности параметров в процессе эксплуатации и воздействия внешних факторов;
- постоянное расширение номенклатуры в области специального применения, в том числе создание широкой гаммы СВЧ-резисторов, аттенуаторов, сумматоров.

Основные перспективы развития рынка СВЧ ПЭК основаны на появлении новых видов продукции:

- толстопленочных и тонкопленочных СВЧ-чип резисторов, поглотителей, аттенуаторов, делителей мощности;
- многослойных, пленочных и керамических СВЧ-чип конденсаторов;
- многослойных и пленочных СВЧ-чип индуктивности;
- интегрированных пассивных СВЧ-чип компонентов на основе пленочных и многослойных RLC-структур;
- СВЧ АЭК (диапазон частот от 2 до 20 ГГц) (резонаторы и фильтры, дуплексоры на их основе и т.д.) нового поколения на основе тонкопленочных гетероэпитаксиальных структур AlN, GaN, ZnO, в английской транскрипции – FBAR, film bulk acoustic resonator. Например, только у фирмы Avago Technologies число проданных фильтров по технологии FBAR в 2008 г. превысило 1 млрд штук;
- систем радиочастотной идентификации (РЧИ, RFID-системы) на основе пассивных акустоэлектронных СВЧ ПАВ-меток, не требующих дополнительных источников питания;
- акустоэлектронных сенсоров физических и механических величин (температура, давление, ускорение, деформация, напряжение и т.д.), акустоэлектронных газоанализаторов типа «электронный нос», анализаторов жидкости, микробиосенсоров и т.д. для микросистемной техники.

Контроль параметров новых видов ЭКБ как составная и неотъемлемая часть технологического процесса при их разработке и производстве требует инновационного подхода к разработке и выпуску контрольно-измерительного оборудования (КИО). Оно должно обеспечивать сочетание традиционного подхода к разработке КИО, номенклатуре параметров и методам измерения со специфическими устройствами адаптации измеряемых изделий к измерительным системам (приборам) (контактные и зондовые устройства, вводы питания, согласующие трансформаторы, зондовые станции и др.). Именно по этому пути идут ведущие западные фирмы, например Agilent Technologies, создавая на основе стандартных измерительных систем благодаря использованию соответствующих опций разнообразное специализированное оборудование для лабораторий и производства.

Выпуск новой продукции СВЧ-изделий электронной техники высокой функциональной сложности невозможен без опережающего развития метрологического обеспечения на всех этапах жизненного цикла изделия – от контроля качества исходных материалов до сертификации готовой продукции, включая испытания на надежность и долговечность. Одним из важных этапов в технологическом цикле изготовления радиоэлектронной аппаратуры в настоящее время является также входной контроль электронной компонентной базы (отечественного и иностранного производства) у потребителя.

Контрольно-измерительная техника, используемая в настоящее время при разработке отечественной ЭКБ, либо устарела, либо отсутствует, особенно в области создания ЭКБ для высокоточного оружия. До 90% парка КИО составляют приборы старше 15–20 лет, новые поступления отечественного КИО составляют единицы. Контроль параметров новых видов ЭКБ (особенно твердотельной СВЧ-электроники) возможен только при наличии специфических устройств адаптации измеряемых изделий к измерительным системам (приборам) (более детально анализ состояния и тенденций развития этого направления изложен в гл. 15).

Понимание Правительством РФ роли и места СВЧ-техники в решении задачи обеспечения технологической безопасности государства определило появление целого ряда соответствующих программ и нормативно-правовых документов, определяющих среднесрочные и долгосрочные задачи в этом научно-техническом направлении.

Прежде всего, в РФ технологии создания изделий СВЧ-электроники отнесены к критичным (приоритетным) технологиям, которые определяют тактико-технические характеристики систем радиоэлектронного вооружения и военной техники.

На протяжении ряда лет реализуется целый ряд государственных и федеральных целевых программ («Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники» на 2008–2015 годы, «Развитие оборонно-промышленного комплекса Российской Федерации на 2011–2020 годы»), в том числе ряд комплексных целевых программ развития СВЧ-электроники для обеспечения перспективных и существующих систем вооружений и военной техники, радиоэлектронной аппаратуры двойного и гражданского применения и др.

Наиболее важным из принятых руководством РФ программных документов по развитию отечественной СВЧ-техники является утвержденная в декабре 2012 г. **«Стратегическая программа исследований технологической платформы СВЧ-технологии»**, вводная (обзорная) часть которой почти без изменений использована авторами в тексте настоящего раздела [1].

Структура, цели и задачи этой программы примерно соответствуют многочисленным вышеупомянутым зарубежным программам исследований и разработок изделий СВЧ-электроники.

Ниже изложим максимально близко к тексту этого документа его основные положения.

10.2. Состояние и тенденции развития технологий СВЧ-электроники в Российской Федерации

10.2.1. Анализ технического уровня отечественных СВЧ-приборов

Отечественные СВЧ-приборы представлены двумя основными классами изделий: электровакуумные СВЧ-приборы, полупроводниковые СВЧ-приборы и устройства.

В табл. 10.1 приведены основные виды электровакуумных СВЧ-приборов и устройств, имеющие мировой и российский приоритет, технические и технологические решения которых защищены патентами Российской Федерации. По совокупности своих технических и эксплуатационных характеристик эти приборы являются лучшими в своих классах и в целом соответствуют мировому техническому уровню.

В таблице приведены области применения этих СВЧ-приборов, лидирующие предприятия-разработчики и изготовители, а также представлены применяемые для этих же целей приборы за рубежом и их изготовители.

Таблица 10.1. Основные виды электровакуумных СВЧ-приборов и устройств, имеющие мировой и российский приоритет [1]

Области применения	Применяемые в России СВЧ-приборы (лидирующее предприятие-изготовитель)	Применяемые за рубежом СВЧ-приборы (изготовители)
Передающие устройства малогабаритных радиолокаторов бортового и наземного базирования	Малогабаритные многолучевые клистроны с импульсной выходной мощностью более 400 Вт и удельной мощностью более 1 кВт/кг ФГУП «НПП «Исток» ФГУП «НПП «Торий»	Аналогов нет. Применяются ЛБВ, имеющие большие питающие напряжения и массогабаритные характеристики
Передающие устройства систем радиолокации бортового, мобильного и корабельного базирования	Мощные многолучевые клистроны, клистроны средней мощности с комплексом параметров мирового уровня ФГУП «НПП «Торий» «НПП «Исток» ОАО «Светлана»	<i>Communications & Power Industries</i> США; <i>Raytheon</i> США; <i>L-3</i> США; <i>Thales</i> Франция;
Измерительная техника, медицина (КВЧ-терапия), научные исследования, космическая связь, радиоастрономия	Единственная в мире серия широкодиапазонных электрически перестраиваемых генераторов типа ЛОВ (13 приборов), непрерывно перекрывающих диапазон 36–1400 ГГц ФГУП «НПП «Исток»	Аналогов нет. Серийно выпускаются полупроводниковые приборы до 100 ГГц. Ведутся разработки полупроводниковых приборов в более высоких частотных диапазонах
Приемные тракты радиолокационных систем бортового, мобильного и корабельного базирования	ЦЗКУ — входные малошумящие усилители с защитой на циклотронном резонансе не имеют аналогов в мире. Диапазон частот 0,7–15 ГГц с рабочей полосой 5–15%, $K_{ш} = 1,5–4$ дБ, Р вх доп 10–200 кВт (имп.), 0,3–2 кВт (средн.), ослабление в режиме защиты 100–130 дБ, время восстановления 10–30 нс ФГУП «НПП «Исток»	Аналогов нет. В качестве защитных устройств применяются альтернативные решения с худшими параметрами по времени восстановления
Передающие устройства бортовых РЛС, РЛС мобильных и корабельных ЗРК ближнего действия	«Прозрачные» ЛБВ с уникальным набором технических характеристик по выходной мощности, полосе усиливаемых частот, КПД и массе ОАО «НПП «Алмаз» ФГУП «НПП «Исток»	Аналогов нет. Применяются технические решения с использованием нескольких передатчиков
Передающие устройства систем и комплексов связи и радиоэлектронного противодействия наземного, корабельного и бортового базирования	Широкополосные (октавные) ЛБВ с замедляющей системой спирального типа ОАО «НПП «Алмаз»	<i>Communications & Power Industries</i> США; <i>Raytheon</i> США; <i>L-3</i> США; <i>Thales</i> Франция
Бортовые и наземные комплексы различного назначения (БРЛС, связь, РЭБ и пр.)	Мощные высокопотенциальные ЛБВ с замедляющей системой на цепочках связанных резонаторов ФГУП «НПП «Исток»	<i>Communications & Power Industries</i> США; <i>Raytheon</i> США; <i>L-3</i> США; <i>Thales</i> Франция
Системы и комплексы связи космического базирования	ЛБВ космического применения ОАО «НПП «Алмаз»	<i>Communications & Power Industries</i> США; <i>Raytheon</i> США; <i>L-3</i> США; <i>Thales</i> Франция

В табл. 10.2 приведены основные виды полупроводниковых СВЧ-приборов и устройств, имеющие российский приоритет. Следует отметить, что лидирующие позиции в мире по этой номенклатуре продукции занимают зарубежные фирмы. Области использования этих приборов и лидирующие зарубежные производители также представлены в таблице.

Таблица 10.2. Основные виды полупроводниковых СВЧ-приборов и устройств, имеющие российский приоритет [1]

Области применения	Номенклатура полупроводниковых СВЧ-приборов и устройств (изготовители)	Лидирующее предприятие-изготовитель
Радиоэлектронные устройства различного функционального назначения дециметрового, сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн	Мощные и малошумящие биполярные и полевые транзисторы на основе гетероструктур арсенида галлия, нитрида галлия, фосфида индия ФГУП «НПП «Пульсар»; ФГУП «НПП «Исток» ИСВЧПЭ РАН	TriQuint Semiconductor США; Cree США; M/A-Com Technology Solutions США
Радиоэлектронные устройства различного функционального назначения сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн. Радиолокационная аппаратура с АФАР. Системы радиопротиводействия	Монолитные арсенид-галлиевые интегральные СВЧ-схемы (МИС СВЧ) различного функционального назначения, в том числе многофункциональные МИС СВЧ «core-chip», выполненные на одном кристалле в едином технологическом процессе ФГУП «НПП «Исток», ОАО «НИИПП»	TriQuint Semiconductor США; M/A-Com Technology Solutions США; Motorola Solutions США; Conexant Systems Inc. США; Microsemi США; Hittite Microwave Corp. США; Fudjitsu Япония; Toshiba Япония; IHP Германия; Ommic Франция; UMS Франция
Радиоэлектронные устройства различного функционального назначения дециметрового, сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн	Гибридно-монолитные модули СВЧ различной функциональной сложности на основе СВЧ-транзисторов и МИС СВЧ, включающие в том числе цифровые схемы управления и обработки сигналов, преобразователи питания, модуляторы, ферритовые развязывающие устройства и пр., изготовленные на основе теплоотводящих плат из поликора и многослойных керамических материалов ФГУП «НПП «Исток»; ОАО «НИИПП»; ОАО «НПП «Салют»	TriQuint Semiconductor США; Cree США; M/A-Com Technology Solutions США; Motorola Solutions США; Conexant Systems Inc. США; Microsemi США; Hittite Microwave Corp. США; CPI США; L-3 США; Raytheon США; Fudjitsu Япония; Toshiba Япония; IHP Германия; Ommic Франция; Thales Франция; UMS Франция
Радиолокационные средства с АФАР бортового, мобильного и корабельного базирования	Приемопередающие submodule многоканальных ППМ активных фазированных антенных решеток ФГУП «НПП «Исток»	Raytheon США; Thales Франция
Системы высокочотного оружия	Управляющие и преобразовательные МИС миллиметрового диапазона ОАО «НИИПП»	TriQuint Semiconductor США; M/A-Com Technology Solutions США
Радиоэлектронная аппаратура космического и специального применения	МИС и модули СВЧ с повышенной стойкостью к специальным факторам ОАО «НПП «Салют»; ФГУП «НПП «Исток»	TriQuint Semiconductor США; Cree США; M/A-Com Technology Solutions США

В России (как и ранее в СССР) основным рынком сбыта изделий СВЧ-электроники является рынок радиоэлектронной аппаратуры военного назначения. Именно он формирует требуемые совокупности технических и эксплуатационных характеристик для конкретных изделий СВЧ-электроники, а также является главным двигателем научно-технического прогресса в области отечественной СВЧ-электроники. Изделия СВЧ-электроники, предназначенные прежде всего для генерации, усиления и преобразования энергии СВЧ-колебаний в приемных и передающих трактах радиоэлектронной аппаратуры различных частотных диапазонов, в значительной степени определяют облик, архитектуру построения и основные тактико-технические характеристики современных и перспективных систем и комплексов радиолокации, радионавигации, всех видов связи, радиоэлектронной разведки и радиоэлектронного противодействия, систем управления вооружением, систем высокоточного оружия и др.

В то же время имеется достаточно применений СВЧ-приборов и устройств в гражданском секторе экономики (в системах управления воздушным движением, в медицине, сельском хозяйстве, атомной промышленности, в промышленной электронике — ускорителях заряженных частиц, технологических установках нагрева, спекания и специальной обработки различных материалов, на железнодорожном и автомобильном транспорте и пр.). Бурное развитие в последние годы систем локальной и беспроводной связи также предопределяет широкое применение изделий СВЧ-электроники и информационных и телекоммуникационных технологий с обеспечением широкополосного доступа абонентов к источникам информации. Интенсивно развиваются оптоволоконные сети и линии связи на основе внедрения технологий GPON, распространения сети Интернет, освоения методов электронного правительства и перехода к цифровым методам формирования, обработки и вещания телевизионной информации. Количество абонентов сети Интернет в России (41 млн) превысило аналогичные показатели Франции и Великобритании и продолжает стремительно расти; средняя скорость доступа составляет 10 Мб/сек, причем возможности технологии GPON уже достигли 1 Гб/сек. Развиваются домашние мультимедийные сети DLNA и интернет-телевидение IPTV, технологии OTT, доставка телевизионной и иной информации, помимо эфирного, кабельного и спутникового вещания, через мобильные сети по новым технологиям 3G, 4G, LTE и др. В Москве, Санкт-Петербурге и ряде других городов осуществляется полный переход на оптоволоконные линии. В настоящее время, однако, подавляющая часть оборудования сетей — зарубежного производства.

Эти процессы и необходимость импортозамещения требуют разработки и энергичного освоения производства, а также эксплуатации новых типов абонентских и линейных терминалов оптоволоконных сетей, а реально осуществляющаяся на практике конвергенция различных видов доставки информации и потребления информационных услуг связана с созданием принципиально новых типов абонентской аппаратуры — семейства многофункциональных терминалов и цифровых приставок различных комбинаций функциональности, благодаря которым телевизор становится интерактивным терминалом и центром индивидуальной информационной (справочной, учебной, развлекательной) системы. Ее возможности дополнительно

расширяются с переходом в течение ближайшего пятилетия на телевидение сверх- и ультравысокой четкости, объемное, затем голографическое и т.д.

При этом решение задач импортозамещения в России должно рассматриваться не как создание аналогов конкретных электронных компонентов СВЧ, а как создание соответствующего технологического базиса, позволяющего проектировать и создавать электронные компоненты СВЧ с заданными техническими и эксплуатационными характеристиками.

Потенциальная емкость гражданского рынка в России в первую очередь определяется действующими и развертываемыми системами, такими как:

- аппаратура систем управления воздушным движением, включающая: аэродромные и трассовые локаторы, глиссадные маяки, метеолокаторы, системы навигации и связи;
- аппаратура глобальной навигационной системы позиционирования «ГЛОНАСС»;
- аппаратура систем сотовой и беспроводной связи;
- системы цифрового телевидения и связи;
- оптоволоконные инфокоммуникационные сети;
- радиорелейные линии связи;
- системы идентификации грузов;
- системы спасения на море и на суше;
- системы управления движением автомобильного транспорта;
- изделия личного пользования, такие как: портативные навигаторы глобальных навигационных систем «Navstar» и «ГЛОНАСС», радиомаяки, пейджеры, радиотелефоны и др.

В соответствии с Вассернаанскими международными соглашениями, участником которых является и Российская Федерация, существуют государственные ограничения на экспорт (распространение) приборов, устройств и технологий двойного назначения, которые могут быть использованы при создании вооружения и военной техники. Эти ограничения после подписания всеми сторонами вводятся в каждой из стран-участниц соответствующими решениями Правительства. Раз в несколько лет эти ограничения пересматриваются и, соответственно, переиздаются. В Российской Федерации действует аналогичный документ – Указ Президента РФ от 5 мая 2004 г. № 580. В части СВЧ-техники эти ограничения затрагивают достаточно широкую номенклатуру приборов, устройств и технологий их разработки и производства.

Наряду с другими, эти ограничения затрагивают приборы и устройства СВЧ в диапазонах выше 31 ГГц. Именно в этих диапазонах (40, 60, 90–100 ГГц) разрабатываются системы высокоточного оружия, системы скрытой связи, высокоскоростные системы беспроводной связи и телекоммуникационные системы большой емкости. Это предопределяет необходимость их создания в Российской Федерации, поскольку их импорт из-за рубежа в промышленных объемах для разработки и производства соответствующих систем практически недоступен.

В условиях жесткой конкуренции на международном рынке вооружений существует необходимость сохранения лидерства в области основных СВЧ-

компонентов, обеспечивающих превосходство тактико-технических характеристик систем отечественного радиоэлектронного вооружения, обеспечения технологической независимости СВЧ-компонентов как при разработке (модернизации) и производстве, так и при боевом применении, эксплуатации и ремонте ВВТ.

Высокие требования, предъявляемые к перспективным системам и комплексам различного функционального предназначения (различные степени энергетического обеспечения – от долей ватт до нескольких сотен мегаватт, необходимость функционирования в различных частотных диапазонах с различными полосами рабочих частот и различными видами сигналов, снижение массогабаритных показателей в 10–40 раз, повышение в 5–30 раз их надежности, обеспечение высокой стойкости к механическим перегрузкам до 40 000g, значительное расширение функциональных возможностей информационных систем, систем высокоточного оружия, радиолокационных головок самонаведения, систем РТР, РЭП и др.), определяют необходимость развития всех групп изделий СВЧ с приоритетным развитием изделий твердотельной СВЧ-электроники, а также мощных вакуумных СВЧ-приборов миллиметрового и терагерцового диапазонов.

Области использования частотного диапазона радиоэлектронными средствами различного назначения и достигаемый при этом энергетический потенциал различными группами приборов СВЧ показаны на рис. 10.1. В скобках приведены наиболее характерные для указанных здесь РЭС временные циклы работы (отношения длительности излучаемых импульсов к периоду их повторения).

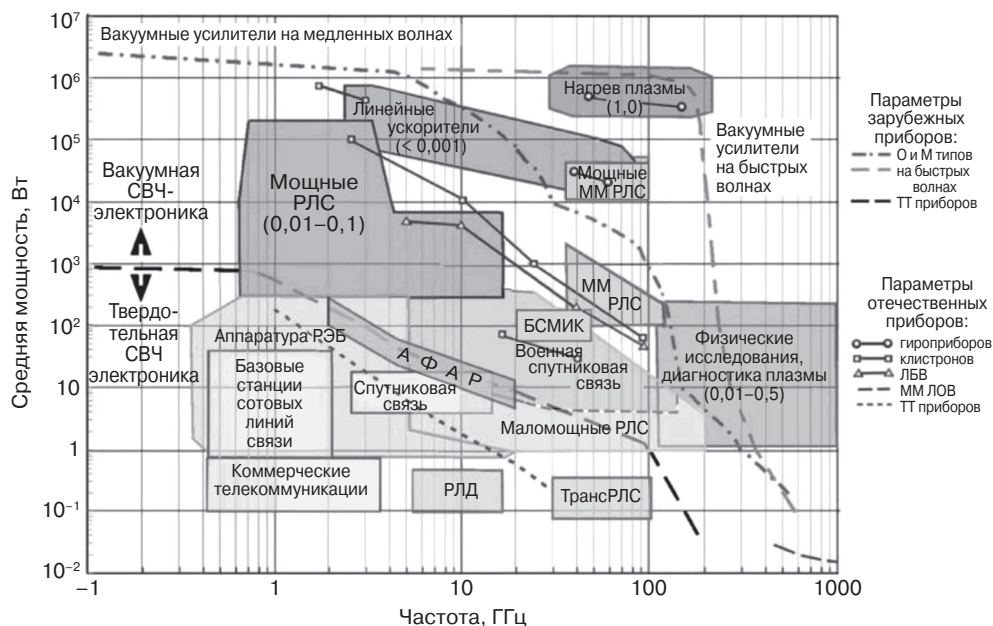


Рис. 10.1. Области использования частотного диапазона радиоэлектронными устройствами и технический уровень основных СВЧ-приборов и устройств

10.2.2. Основные направления исследований и разработок в сфере деятельности технологической платформы

10.2.2.1. Направления развития отечественных СВЧ-приборов на период до 2020 г.

Основными видами радиоэлектронной аппаратуры вооружения и военной техники (РЭА ВВТ), определяющими уровень требований, предъявляемых к параметрам изделий электроники СВЧ, являются радиолокационные станции ПВО, ПРО и разведывательно-ударных комплексов, средства радиотехнической разведки и РЭП, средства связи различного назначения, радиопередающие и радиоприемные устройства активных головок самонаведения ракет различного базирования, радиоэлектронные средства систем высокоточного оружия.

Исходя из этого на период до 2020 г. сформированы направления развития основных классов приборов и устройств СВЧ и соответствующих технологических базисов (табл. 10.3–10.5).

Приборное направление развития включает в себя три раздела:

- твердотельная электронная компонентная база СВЧ;
- электровакуумные приборы СВЧ;
- ферритовые приборы СВЧ.

В табл. 10.3 представлены основные направления развития твердотельной электронной компонентной базы СВЧ – основные тактико-технические характеристики (ТТХ) и запланированные для достижения их численные значения (на 2011, 2015 и 2020 гг.).

Здесь перечислены основные ТТХ для следующих классов СВЧ-приборов:

- генераторные СВЧ-диоды на широкозонных полупроводниковых материалах;
- транзисторы СВЧ генераторные;
- транзисторы СВЧ малошумящие;
- МИС генераторы малошумящие и высокостабильные;
- МИС генераторы с электрической перестройкой частоты;
- твердотельные генераторы шума;
- МИС малошумящие широкополосные усилители;
- МИС усилители мощности;
- МИС сверхширокополосные усилители мощности;
- МИС и функциональные устройства для приемопередающих модулей АФАР X-диапазона;
- модули-синтезаторы частот для РЛС и средств радиоэлектронной борьбы;
- МИС-преобразователи сигналов (умножители, делители, коммутаторы, детекторы и др.).

В табл. 10.4 представлены основные направления развития и ТТХ электровакуумных приборов СВЧ:

- широкополосные ЛБВ средней и большой мощности и непрерывного действия;
- ЛБВ импульсного действия средней мощности для РЛИ;

Таблица 10.3. Направления развития твердотельной электронной компонентной базы СВЧ на период до 2020 г.

Основные ТТХ	Достижимые значения параметров		
	2011 г.	2015 г.	2020 г.
<i>1. Генераторные диоды СВЧ на широкозонных полупроводниковых материалах</i>			
Мощность генерации на частоте, мВт/ГГц	500/37; 100/100	30–50/300	50–60/300
<i>2. Транзисторы СВЧ генераторные</i>			
Выходная мощность на частоте, Вт/ГГц	500/1; 40/3; 6/10	1000/1; 100/3; 10/10	1000/1; 200/3; 15/10
<i>3. Транзисторы СВЧ малошумящие</i>			
Коэффициент шума на частоте, дБ/ГГц	0,3/12; 1,5/60	0,3/12; 1,5/60	1,0–1,5/100
<i>4. МИС генераторы малошумящие и высокостабильные</i>			
Верхняя частота, ГГц	37,5	60–100	220
Нестабильность частоты, отн. ед.	10^{-4} – 10^{-6}	10^{-5} – 10^{-7}	10^{-5} – 10^{-7}
Непрерывная выходная мощность, мВт	10–30	20–50	20–50
<i>5. МИС-генераторы с электрической перестройкой частоты</i>			
Диапазон частот, ГГц	0,3–100	0,3–200	0,3–300
Выходная мощность, мВт	10–300	10–300	10–300
Полоса перестройки, %	10–67	10–67	10–67
Долговременная нестабильность частоты, отн. ед.	10^{-5}	10^{-5}	10^{-5}
<i>6. Генераторы шума твердотельные</i>			
Диапазон частот, ГГц	0,3–150	0,3–300	0,3–300
Уровень СПМШ, дБ/кГ ₀	20	30	30
<i>7. Малошумящие монолитные усилители сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн (в том числе на НЕМТ-структурах и тройных соединениях)</i>			
Коэффициент шума на частоте 4 ГГц, дБ	1–2	0,8	0,5
Коэффициент шума на частоте 60 ГГц, дБ	3–4	2,5	1,5
Коэффициент шума на частоте 90–100 ГГц, дБ	5–6	4–5	3,5
Полоса частот, %	10–33	10–66	10–66
<i>8. МИС малошумящие широкополосные усилители</i>			
Диапазон частот, ГГц	1–26, 26–40	1–60	1–60
Коэффициент шума, дБ	6	5	5

Таблица 10.3 (продолжение)

Основные ТТХ	Достижимые значения параметров		
	2011 г.	2015 г.	2020 г.
<i>9. МИС усилители мощности</i>			
Выходная мощность на частоте 9 ГГц, Вт	10–12	20	30
Выходная мощность на частоте 40 ГГц, Вт	5	8	10
Выходная мощность на частоте 110 ГГц, Вт	1–1,5	2	3
Удельная мощность на частоте 10 ГГц, Вт/мм	0,7–0,8	1,5–1,8	3,0–3,5
КПД в см диапазоне, %	35	более 40	40–50
КПД в мм диапазоне, %	20–25	25–30	30–40
<i>10. МИС сверхширокополосные усилители мощности</i>			
Диапазон частот, ГГц	1–18, 18–26, 26–40	1–18, 18–26, 26–40	1–110
Мощность, Вт	1–2	2–3	5
Удельная мощность, Вт/мм	0,7–0,8	1,5–1,8	3,0–3,5
<i>11. МИС и функциональные устройства для приемопередатчиков модулей АФАР X-диапазона</i>			
Диапазон частот, ГГц	9–10,5	8,0–12,5	8,0–12,5
Выходная мощность импульсная, Вт	10–12	15	25
КПД, %	30	45	45–50
Коэффициент шума, дБ	1,5–1	менее 1	менее 1
Дискрет фазы, град.	5,128	2,8	2,8
Время переключения фазы, мкс	0,05	0,025	0,0125
<i>12. Модули-синтезаторы частот для РЛС и средств РЭП</i>			
Диапазон частот, ГГц	0,5–18, 18–26, 26–40	0,5–170	0,5–170
Время переключения, мкс	0,3–0,05	0,1–0,003	0,1–0,003
Нестабильность частоты, отн. ед.	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹²	10 ⁻¹²
<i>13. МИС преобразователи сигналов (умножители, делители, коммутаторы, аттенюаторы, детекторы, смесители и пр.)</i>			
Диапазон частот, ГГц	0,3–30	0,3–60	0,3–100
<i>14. Линии задержки</i>			
Задержка, мкс	3	10	до 100

Таблица 10.3 (окончание)

Основные ТТХ	Достижимые значения параметров		
	2011 г.	2015 г.	2020 г.
<i>15. Переключатели СВЧ-сигналов</i>			
Число каналов	2, 3, 4, 8	2, 3, 4, 8	2–64
Диапазон частот, ГГц	0,3–18	0,3–26	0,3–40
Входная импульсная мощность, Вт	50	100	до 1000 (средняя до 50)
Характеристика технологического базиса твердотельной СВЧ-электроники			
Материалы	Материалы группы A ₃ B ₅ , A ₃ B ₆	Материалы группы A ₃ B ₇ , A ₂ B ₆	Материалы группы A ₃ B ₅ , A ₃ B ₆ , алмаз
Технология	HEMT, HBT	LD MOS, SiT, HEMT, HBT	LD MOS, SiT, HEMT, HBT
Эпитаксия	МОСVD, МЛЭ	МОСVD, МЛЭ	МОСVD, МЛЭ
Диаметр пластин, мм	75–100	100–150	100–150
Топологическое разрешение, мкм	0,15–0,1	0,1–0,07	0,1–0,07

Таблица 10.4. Направления развития электровакуумных приборов СВЧ на период до 2020 г.

Основные ТТХ	Достижимые значения параметров		
	2011 г.	2015 г.	2020 г.
<i>1. Широкополосные ЛБВ средней и большой мощности непрерывного действия для средств РЭП и техники связи</i>			
Диапазон частот, ГГц	1–40	1–40	1–40
Полоса частот, %	100	120	130
Выходная мощность на частотах до 18 ГГц, кВт	0,2	0,5	1
<i>2. ЛБВ импульсного действия средней мощности для РЛС</i>			
Максимальная рабочая частота, ГГц	100	100	100
Выходная импульсная мощность, кВт (в X-диапазоне) (в Ku-диапазоне) (в Ka-диапазоне)	17 3 1	20 6 2	60 6 2
Полоса усиливаемых частот, % (в X-диапазоне) (в Ku-диапазоне) (в Ka-диапазоне)	8 4 4	10 6 5	10 8 6
Неравномерность коэффициента усиления при постоянной входной мощности, дБ	1,5	1,5	1,5
<i>3. ЛБВ бортовых космических средств связи</i>			
Диапазон частот, ГГц	45	60	100
Выходная мощность в непрерывном режиме, Вт	50	100	100
КПД, %	50	60	65
Наработка, тыс. ч	100	150	150
<i>4. Клитроны широкополосные мощные непрерывного действия для средств тропосферной связи</i>			
Диапазон частот, ГГц	0,4–1,5	1–10	1–15
Выходная мощность, кВт	20	500	500
Диапазон перестройки частоты, %	10–14	5	10
КПД, %	35	40	40
<i>5. Клитроны импульсного действия для ВТО бронетанковой техники</i>			
Диапазон частот, ГГц	40	100	100
Мощность выходная импульсная, кВт	0,5	1	3
Мощность выходная средняя, Вт	100	100–150	200

Таблица 10.4 (продолжение)

Основные ТТХ	Достижимые значения параметров		
	2011 г.	2015 г.	2020 г.
<i>6. Мощные импульсные клапстрыны для РЛС обнаружения и целеуказания</i>			
Диапазон частот, ГГц	1–18	1–18	1–26
Управляющее напряжение, кВ	5–7	3	1
<i>7. Мощные импульсные клапстрыны миллиметрового диапазона длин волн для информационных РЭС наземного и космического базирования</i>			
Диапазон частот, ГГц	36	100	100
Мощность выходная импульсная, кВт	30	10–30	100
Полоса частот, МГц	200	300	500
<i>8. Мощные импульсные гиросилители (клапстрыны, ЛБВ) миллиметрового диапазона длин волн для РЛС наземного базирования</i>			
Диапазон частот, ГГц	36	36	100
Мощность выходная импульсная, кВт	400	300	500
Полоса частот, МГц	100	200–500	300–500
КПД, %	20	30	30
<i>9. Безнакальные импульсные магнетроны для бортовых РЭС</i>			
Диапазон частот, ГГц	10–40	10–40	10–40
Мощность выходная импульсная, кВт	3–10	3–10	1–10
Напряжение анода, кВ	6–8	4–6	2–4
<i>10. Импульсные магнетроны миллиметрового диапазона длин волн для мобильных РЭС ВТО</i>			
Диапазон частот, ГГц	100–150	100–150	100–150
Мощность выходная импульсная, кВт	4	6–10	10
Длительность импульса, мкс	0,07	0,03	0,02
Скважность	5000	2000	2000
<i>11. Импульсные магнетроны синхронизированные миллиметрового диапазона длин волн для мобильных РЛС и РЭС ВТО</i>			
Диапазон частот, ГГц	100	100–150	100–150
Полоса частот, МГц	200	250	300
Мощность выходная импульсная, кВт	0,1–0,3	0,3	0,3
Длительность импульса, мкс	2	2–5	2–5
Скважность	500	200	100

Таблица 10.4 (окончание)

Основные ТТХ	Достижимые значения параметров		
	2011 г.	2015 г.	2020 г.
<i>12. Сверхмощные импульсные усилители и генераторы (релятивистские клистроны и маянтроны, виркатроны) сантиметрового диапазона длин волн для энергетических средств поражения</i>			
Диапазон частот, ГГц	3–30	3–30	3–30
Мощность выходная импульсная, МВт	50	150	1000
Полоса частот, %	0,5	2,5	5
КПД, %	30	30–50	30–50
Длительность импульса, мкс	0,5	2,0	2,5
Скважность	2000	1000	500
<i>13. Сверхмощные непрерывные ЛБВ для РЛС</i>			
Диапазон частот, ГГц	0,4–1,5	0,4–1,5	0,4–1,5
Выходная мощность, кВт	100	100	100
Полоса усиливаемых частот, %	10	10	15
КПД, %	25	35	45
Характеристика технологического базиса электровакуумной СВЧ-электроники			
Обработка металлов	Механическая и электронискровая	Механическая, электронискровая и лазерная	Механическая, электронискровая и лазерная
Точность обработки элементов конструкций, мкм	0,3–0,5	0,2–0,3	0,1–0,2
Формоустойчивость электродов, образующих электронно-оптические и электронно-динамические системы, мкм	10	5–10	5–7
Точность изготовления программируемых по длине плеченочных поглотителей, %	20	5–10	5–7
Точность и соосность прошивки прецизионных отверстий и глубоких каналов в ЭОС и в замедляющих системах, мм	±0,015	±0,01	±(0,005–0,01)
Чувствительность контроля герметичности, л. мк. тор/с	10 ⁻¹²	10 ⁻¹⁴	10 ⁻¹⁴
Плотность тока катода многолучевых ЭОС с управляющим электродом, А/см ²	до 20	100	более 100
Относительный уровень управляющего напряжения ($U_{упр}/U_0$), %	6–8	3–8	3–6
Срок службы многолучевых ЭОС с управляющим электродом, тыс. ч	50	100	150
САПР	двухмерные	трехмерные	трехмерные

Таблица 10.5. Направления развития ферритовых приборов СВЧ на период до 2020 г.

Основные ТТХ	Достижимые значения параметров		
	2011 г.	2015 г.	2020 г.
<i>1. Ферритовые вентили и циркуляторы высокого уровня мощности</i>			
Мощность непрерывная, Вт: на частотах 26–40 ГГц 93–96 ГГц 130–150 ГГц	500–2000 — —	50–2000 100–500 50–200	50–2000 100–500 100–300
Прямые потери, дБ	0,2–0,6	0,2–0,5	0,2–0,3
Обратные потери, дБ	20	20	20
<i>2. Ферритовые фазовращатели</i>			
Диапазон частот, ГГц	30–37,5	30–37,5	100
Энергия переключения, мкДж	80	40–80	20
Время переключения фазы, мкс	10–30	5–10	1–5
<i>3. СВЧ перестраиваемые фильтры на МСВ</i>			
Диапазон частот, ГГц	4–18	4–26	4–40
Полоса частот, МГц	10–350	10–350	10–350
Потери, дБ	5–6	4–5	2–4
Заграждение, дБ	35	35–50	40–60
Характеристика технологического базиса ферритовой СВЧ-электроники			
Точность обработки ферритовых вкладышей и арматуры приборов по мере продвижения в верхние частоты, мкм	1–3	0,5–1,5	0,5–1,0
Уровень допустимой неравномерности плотности по объему ферритового вкладыша, %	0,2	0,1	0,05
Стабильность техпроцесса обжига ферритов, %	3	1,5	1,0–1,5
Тангенс диэлектрических потерь феррошпинелей с намагниченностью 3500–5000 Гс, $\text{tg}\delta \cdot 10^4$	1	0,5	0,3–0,5
Тангенс магнитных потерь феррошпинелей с намагниченностью 3500–5000 Гс, $\text{tg}\delta_H \cdot 10^4$	5	3	1–3

- ЛБВ бортовых космических средств связи;
- клистроны широкополосные мощные непрерывного действия для средств тропосферной связи;
- клистроны импульсного действия для ВТО бронетанковой техники;
- мощные импульсные клистроны для РЛС обнаружения и целеуказания;
- мощные импульсные клистроны миллиметрового диапазона волн для информационных РЭС наземного и космического базирования;
- мощные импульсные гироусилители (ЛБВ, клистроны) для РЛС наземного базирования;
- бесканальные импульсные магнетроны для бортовой РЭА;
- импульсные магнетроны миллиметрового диапазона волн для мобильных РЭС ВТО;
- импульсные магнетроны, синхронизируемые в миллиметровом диапазоне для мобильных РЛС;
- сверхмощные импульсные усилители и генераторы сантиметрового диапазона для энергетических средств поражения;
- сверхмощные непрерывные ЛБВ для РЛС.

В табл. 10.5 представлены основные направления развития ферритовых приборов СВЧ:

- ферритовые вентили и циркуляторы высокого уровня мощности;
- ферритовые фазовращатели;
- СВЧ перестраиваемые фильтры на МСВ.

Основными потребителями СВЧ-приборов и устройств с вышеприведенными значениями основных технических параметров являются предприятия радиоэлектронного профиля, занимающиеся разработкой и организацией серийного производства радиоэлектронной аппаратуры гражданского, двойного, а также специального назначения.

Наиболее крупными из них являются предприятия ракетно-космической отрасли, входящие в состав Объединенной ракетно-космической корпорации и Федерального космического агентства «Роскосмос», предприятия государственной корпорации «Ростехнологии», а также широкий спектр предприятий оборонно-промышленного комплекса, выпускающие судовые и автомобильные радары, системы радиосвязи и телекоммуникаций.

10.2.2.2. Основные направления развития отечественных технологий изготовления СВЧ-приборов и устройств

Исходя из вышеизложенного и потребностей рынка гражданской продукции и продукции двойного назначения, сформированы направления исследований и разработок, наиболее перспективные для развития в рамках ТП «СВЧ-технологии». При этом исследования и разработки формируются по трем взаимозависимым направлениям, представленным на рис. 10.2.

Исследования и разработки в области электронного материаловедения и в области электронных СВЧ-компонентов рассматриваются как базис для разработки и внедрения радиоприборостроительных технологий в качестве финального продукта ТП, имеющего перспективный рынок.



Рис. 10.2. Направления исследований и разработок, наиболее перспективные для развития в рамках платформы

Наиболее перспективными для исследований и разработок в рамках ТП «СВЧ-технологии» являются следующие технологические направления.

1. В области электронного материаловедения:

1.1. Создание оптимизированных приборных гетероструктур на основе арсенида галлия с удельной плотностью мощности более 1,5 Вт/мм.

1.2. Создание оптимизированных гетероструктур на основе нитрида галлия и других широкозонных материалов для мощных СВЧ-приборов в дециметровых, сантиметровых и миллиметровых диапазонах длин волн.

1.3. Создание алмазных приборных структур.

1.4. Создание гетероструктур на основе узкозонных полупроводниковых материалов (антимонидов) для СВЧ-приборов и устройств с малым потреблением.

1.5. Создание МЭМС и НЭМС структур.

1.6. Создание нового поколения ферритовых материалов.

1.7. Разработка новых видов катодных материалов.

1.8. Разработка и серийное освоение композитных конструкционных материалов на основе Al-SiC для корпусов и оснований электронных модулей нового поколения.

2. В области электронных СВЧ-компонентов:

2.1. Создание приборных рядов СВЧ-транзисторов и МИС на основе Si, GaAs, SiGe, антимонидов в дециметровых, сантиметровых и миллиметровых диапазонах длин волн.

2.2. Разработка и создание твердотельной элементной базы генерации и детектирования излучения терагерцового диапазона.

2.3. Исследования по совершенствованию технологии создания и конструкций СВЧ-транзисторов и МИС на основе гетероструктур традиционных полупроводниковых материалов: кремния и арсенида галлия в целях получения предельно достижимых электрических и эксплуатационных параметров.

2.4. Разработка технологии создания СВЧ-транзисторов и МИС на основе широкозонных полупроводниковых материалов (GaN, SiC, InP, алмаз, графен), в том числе КВЧ-диапазона (60–200 ГГц).

2.5. Разработка технологии создания многофункциональных однокристалльных МИС СВЧ, включающих в свой состав аналоговые, ключевые и цифровые схемы класса «система на кристалле».

2.6. Разработка технологии создания многофункциональных многокристалльных СВЧ-модулей класса «система в корпусе», в том числе на основе использования многослойных керамических плат с встроенными пассивными компонентами и цепями согласования.

2.7. Разработка технологии создания и базовых конструкций мощных многолучевых малогабаритных электровакуумных приборов и комплексированных устройств на их основе с низкими уровнями питающих напряжений.

2.8. Разработка создание СВЧ-приборов и устройств на новых физических принципах действия, в том числе giroприборов, приборов с ВТСП-магнитными системами, усилителей оротронного типа.

2.9. Создание микровакуумных СВЧ-приборов на основе автоэмиссионных и вторичноэмиссионных катодов.

2.10. Исследования по созданию алгоритмов, моделей и программного обеспечения для решения двух- и трехмерных электронно-оптических задач и моделирования электровакуумных приборов СВЧ (клистронов и ламп бегущей волны), ориентированных на использование кластерных вычислительных систем, многопроцессорных систем и графических ускорителей.

2.11. Разработка технологии создания и базовых конструкций мощных вакуумных СВЧ-приборов миллиметрового и терагерцового диапазонов и комплексированных устройств на их основе.

3. В области СВЧ-радиоприборостроения:

3.1. Создание оптимизированных для массового производства и использования в бытовых условиях технологий управления абонентским устройством с помощью жестов и голосовых команд.

3.2. Создание малогабаритных радиолокационных систем с АФАР в сантиметровых и миллиметровых диапазонах длин волн.

3.3. Разработка технологии создания комплексированных сложнофункциональных блоков и радиоэлектронных устройств на основе нового поколения СВЧ ЭКБ с высокой плотностью компоновки комплектующих для информационных и телекоммуникационных систем.

3.4. Разработка и серийное освоение аппаратуры широкополосной беспроводной связи, навигации и интеллектуальных многофункциональных приемных устройств и терминалов инфотелекоммуникационных сетей.

3.5. Разработка и серийное освоение аппаратуры радиорелейных систем связи и телекоммуникаций Е-диапазона.

3.6. Разработка комплексов специального назначения (досмотровые комплексы, охранные системы, системы радиолокационного наблюдения).

3.7. Разработка высокоточного метрологического оборудования, включая оборудование технологических цепочек разработки и производства СВЧ ЭКБ.

Все эти направления исследований взаимосвязаны между собой и ориентированы на развитие рынков продукции прежде всего двойного и гражданского назначения.

В табл. 10.6 представлены основные направления развития базовых технологий изготовления СВЧ-приборов и устройств на среднесрочный период (2011–2015 гг.).

Таблица 10.6. Основные направления развития технологий изготовления СВЧ-приборов и устройств [1]

№	Направления исследований и разработок	Характеристика результатов и оценка их значимости для решения задач технологических проектов	Применение
1	Технология создания ALGaN/GaN СВЧ транзисторов и МИС на подложках из полиалмаза и SiC, включая технологии изготовления подложек и гетероструктур	Значительное продвижение. Повышение выходной мощности и КПД передающих устройств. Уровень значимости – высокий	Радиоэлектронная аппаратура космического применения. Радиолокационные средства управления воздушным движением. Системы специального назначения
2	Технология создания многокристалльных СВЧ-модулей класса «система в корпусе»	Значительное продвижение. Возможность создания малогабаритных РЭС с АФАР. Уровень значимости – высокий	Радиолокационные системы мониторинга нефте- и газопроводов, акваторий портов и аэродромов, ледовой и метеообстановки.
3	Технология создания СВЧ аналого-цифровых и цифро-аналоговых МИС на SiGe	Значительное продвижение. Снижение массо-габаритных показателей РЭС при значительном росте функциональных возможностей. Уровень значимости – высокий	Системы связи, телевидения и Интернета на быстро движущихся объектах. Радиолокационные средства управления воздушным движением. Системы специального назначения
4	Технология создания multifunctional МИС СВЧ, включающих аналоговые, ключевые и цифровые схемы класса «система на кристалле»	Значительное продвижение. Повышение технологичности изготовления и надежности РЭС с АФАР. Снижение стоимости. Уровень значимости – высокий	Системы специального назначения
5	Технология создания передающих устройств цифрового телевизионного сигнала стандарта COFDM на основе клистронов с выходной мощностью 50–100 кВт и КПД 30–40%	Значительное продвижение. Освоение рынка вещательных станций цифрового телевидения. Уровень значимости – высокий	Передающие центры вещания цифрового телевидения
6	Технология создания основных функциональных узлов для мощных вакуумных приборов (включая гибридные многостольные пространственно-развитые или планарные конструкции) миллиметрового и терагерцового диапазонов	Продвижение в коротковолновую часть миллиметрового диапазона до 100 ГГц и освоение терагерцового диапазона до 1000 ГГц. Обеспечение технологической независимости в области основных СВЧ-компонентов	
7	Технологии создания интеллектуальных multifunctional приемных устройств и терминалов инфотелекоммуникационных сетей	Значительное продвижение. Освоение рынка массовой бытовой и профессиональной телекоммуникационной техники с интеллектуальными функциями. Уровень значимости – высокий	Бытовые и профессиональные телекоммуникационные системы и устройства

10.3. Арсенид-галлиевые технологии изготовления СВЧ-приборов

Промышленные технологии GaAs МИС формировались в 1980–1990-е гг., когда различные компании стремились организовать собственное GaAs-производство. Однако сейчас большинство из них для изготовления МИС частично или полно-

стью пользуются услугами специализированных контрактных производств – так называемых foundries [2]. Ведущие контрактные производители на мировом рынке GaAs-микросхем – компании TriQuint Semiconductor (GCS) – 6%. Продукция этих компаний предназначена в основном для массового рынка МИС для различных устройств и систем мобильной связи. Наиболее крупные европейские компании – United Monolithic Semiconductor (UMS) и OMMIC – специализируются главным образом на мелкосерийном выпуске схем аэрокосмического и военного назначения, но вместе с тем стремятся расширить свое присутствие на глобальном рынке GaAs МИС. Так, компания UMS открыла дизайн-центр в Бостоне и офис по продажам в Шанхае.

Наиболее крупные компании-foundries обрабатывают GaAs-пластины диаметром 150 мм и выполняют заказ в течение шести-восьми недель. Компания WIN гарантирует исполнение заказа в срок от 23 до 48 календарных дней. Некоторые компании с небольшим объемом выпуска сохраняют производственные линии по обработке пластин диаметром 100 мм. Типичная производительность foundries – от нескольких сотен до нескольких тысяч пластин в месяц. Многие контрактные производители, помимо выпуска МИС, оказывают различные услуги в проектировании, моделировании, корпусировании и испытаниях. При этом сами они пользуются услугами других специализированных компаний по программному обеспечению, графическим системам и т.п.

Ряд крупных компаний, таких как Northrop Grumman, Cobham, Raytheon, BAE Systems, которые имеют собственное производство МИС и одновременно участвуют в больших правительственных программах по созданию радиоэлектронных систем вооружений, тоже предлагают специальные услуги. К менее крупным компаниям, имеющим собственные производственные мощности, относятся M/A-COM Technology Solutions, Skyworks, Anadigics, Avago, RFMD и Eudyna/Sumitomo. Как правило, каждая такая компания, помимо разработки новых технологических процессов, владеет и определенным числом отработанных и сертифицированных процессов, которые она предлагает заказчику (табл. 10.7).

Прежде чем более детально рассмотреть состояние GaAs-технологии на мировом рынке, кратко рассмотрим одно из направлений отечественной промышленной технологии – технологии изготовления малощумящих СВЧ-транзисторов.

Таблица 10.7. Состав элементной базы GaAs-технологий ведущих мировых компаний

Тип прибора	TriQuint	WIN	AWSC	GCS	OMMIC	UMS
InGaP HBT	+	+	+	+	+	+
Мощные PHEMT с длиной затвора 0,5 мкм	–	+	+	+	–	+
Мощные PHEMT с длиной затвора 0,25 мкм	+	+	–	+	–	+
Переключающие PHEMT с длиной затвора 0,5 мкм	+	+	+	+	–	+
Переключающие PHEMT с длиной затвора 0,25 мкм	+	–	–	–	–	–
PHEMT с длиной затвора 0,15 мкм	+	+	–	–	+	+
PHEMT с длиной затвора $\leq 0,15$ мкм	+	+	–	–	+	–
Линейные HFET с длиной затвора 0,5 мкм	+	–	–	+	–	–

Таблица 10.7 (окончание)

Тип прибора	TriQuint	WIN	AWSC	GCS	OMMIC	UMS
Линейные HFET с длиной затвора 0,25 мкм	–	–	–	+	–	–
ВНЕМТ	+	–	+	–	–	–
МНЕМТ	+	+	–	–	+	–
MESFET	+	–	–	–	–	–
Диоды	+	–	+	+	+	–
Пассивные МИС	+	–	+	+	–	–

10.3.1. Отечественные арсенид-галлиевые технологии изготовления малошумящих транзисторов СВЧ- и КВ-диапазонов

Необходимость постоянного продвижения в область все более высоких частот, уменьшения уровня шумов и повышения коэффициента усиления приемопередающей аппаратуры, что ведет к увеличению дальности приема, снижению энергопотребления, массы и габаритов аппаратуры, требует совершенствования элементной базы приемопередающей аппаратуры и в первую очередь малошумящих полевых транзисторов с барьером Шоттки СВЧ- и КВЧ-диапазонов частот на соединениях A_3B_5 .

Кратко рассмотрим особенности конструкции и технологии изготовления этих приборов на примере разработок ГУП «НПП «Пульсар», который является одним из ведущих предприятий в области разработки малошумящих транзисторов на GaAs [3]. Именно его специалистами была разработана первая серия отечественных малошумящих транзисторов (ЗПЭ20, ЗПЭ21, ЗПЭ24, ЗП325, ЗН326, ЗП330, ЗП331, ЗП343, ЗП344, ЗП351, ЗП353, А818, А859, А860) с применением для формирования субмикронных затворов как фотолитографии короткого ультрафиолета, так и электронной литографии.

Эти транзисторы впоследствии выпускались на заводе «Пульсар» или в НПО (впоследствии АООТ) «Планета» (г. Новгород).

В НПП «Пульсар» впервые в России были получены образцы малошумящих транзисторов на гетероструктурах AlGaAs/GaAs, сопоставимые по параметрам с зарубежными аналогами, и организован их серийный выпуск [4].

В период 1993–2001 гг. за рубежом высокими темпами развивалась технология изготовления приборов на основе GaAs и других соединений A_3B_5 , что повлекло за собой значительное повышение уровня используемого технологического оборудования. Появились первые установки молекулярно-лучевой эпитаксии, позволяющие выращивать гетероструктуры на основе соединений A_3B_5 (псевдоморфные, метаморфные на основе GaAs и InP) диаметром до 150 мм, установки электронной литографии, позволяющие реализовать затворы длиной менее 0,1 мкм, установки безмаслянной откатки для нанесения металлов и диэлектриков, плазмохимического и ионнохимического травления.

Следует отметить, что малошумящий транзистор требует использования гетероструктур на основе сверхчистых исходных слиточных и шихтовых материалов группы A_3B_5 методами молекулярно-лучевой эпитаксии, получением новых резистов, с новыми процессами нанесения диэлектриков и металлов и процессами их травления.

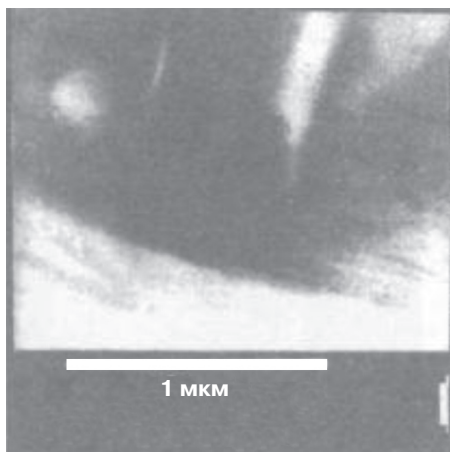


Рис. 10.3. Т-образный затвор длиной 0,28 мкм и толщиной 0,6 мкм

Конструкция этого транзистора весьма чувствительна к атомному составу и толщине легированных слоев, уровню их легирования, толщине спейсера, толщине канала и уровню его чистоты. Это позволяет подавить процессы рассеяния электронов, минимизировать флуктуации электронного тока и, следовательно, шум транзистора.

В НПП «Пульсар» на протяжении ряда лет проводились работы в этом направлении с целью создания **базовой технологии** изготовления транзисторов. В частности, с использованием трехслойной системы резистов (ЭРП-1, ЭЛП-9, ЭРП-1) с помощью установки электронного экспонирования ZBA20 (21) с минимальным размером штампа ($0,2 \times 0,2$ мкм) были получены Т-образные затворы длиной 0,28 мкм (рис. 10.3). Однако данная технологическая схема в реальных условиях является плохо воспроизводимой (зависимость от качества резиста, точности нанесения, стабильности работы установки ZBA и т.п.).

Использование конструкций транзисторов с «воздушными мостами» (рис. 10.4) и, следовательно, с большим количеством межсоединений тоже страдает плохой воспроизводимостью результатов и требует использования высокопрецизионного и дорогого технологического оборудования.

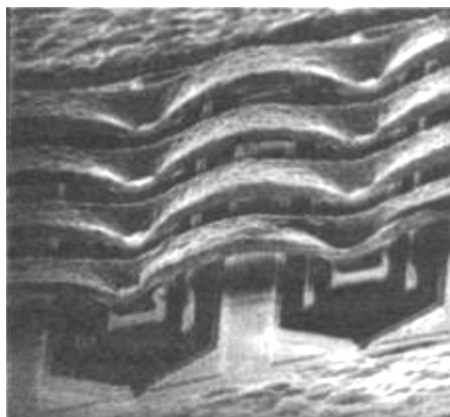


Рис. 10.4. Фрагмент транзистора на частоту 12 ГГц с «воздушными мостами»

В ходе экспериментальных исследований было показано, что оптимальное сочетание шумовых и усилительных свойств имеют транзисторы, изготовленные на основе гетероструктур с равномерным или импульсным легированием.

Были спроектированы оптимальные унифицированные топологии транзисторов с линейной конструкцией затвора, причем транзисторы для различных диапазонов частот отличаются только шириной затвора. По результатам расчетов и моделирования работы транзисторов определены оптимальные величины ширины затвора для каждого частотного диапазона. Для данной унифицированной топологии разработаны технологический маршрут и технологические операции, позволяющие с высокой воспроизводимостью реализовать максимально возможные параметры транзисторов на существующем технологическом оборудовании.

Разработанная отечественная базовая технология позволяет серийно изготавливать транзисторы для диапазона 4–60 ГГц по технологически наиболее простому маршруту, обеспечивающему минимальный уход линейных размеров при формировании затворов транзисторов и сочетающему электронную литографию и фотолитографию с процессом ионнохимического «сухого» травления диэлектрика, что в итоге позволяет получать длины затворов в диапазоне 0,3–0,4 мкм. Кроме этого, характерной особенностью данной отечественной технологии является наличие маркерных знаков (МЗ) на рабочей пластине, которые формируются на этапе создания омических контактов. Многочисленные эксперименты показали, что применение электронной литографии (формирование элемента минимального размера) целесообразно лишь на этапе формирования затвора, а точнее, на самой критической операции – при формировании узкой затворной щели и чуть более широкой полоски при формировании Т-образной формы затвора.

На основе разработанной базовой технологии на предприятии изготавливаются мал шумящие транзисторы с длиной затвора 0,3–0,35 мкм на частоты 4, 12, 37, 60 ГГц с коэффициентами шума $N_f = 0,5; 0,8; 1,9; 2,9$ дБ и коэффициентами усиления 12; 10; 6,5 дБ соответственно.

На рис. 10.5 показана топология транзистора на частоту 4 ГГц, на рис. 10.6 – внешний вид транзистора на частоту 12 ГГц, на рис. 10.7 – транзистор на частоту 37 ГГц.

Разработанная технологическая схема применима не только для изготовления мал шумящих транзисторов. В частности, по разработанной технологии производятся транзисторы средней мощности (с выходной мощностью до 500 мВт на частоте 12 ГГц и 100 мВт на частоте 37 ГГц).

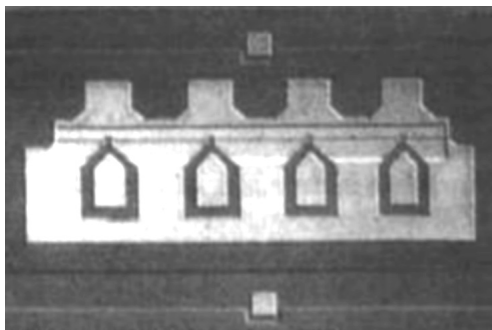


Рис. 10.5. Топология мал шумящего транзистора на частоту 4 ГГц



Рис. 10.6. Малошумящий транзистор на частоте 12 ГГц

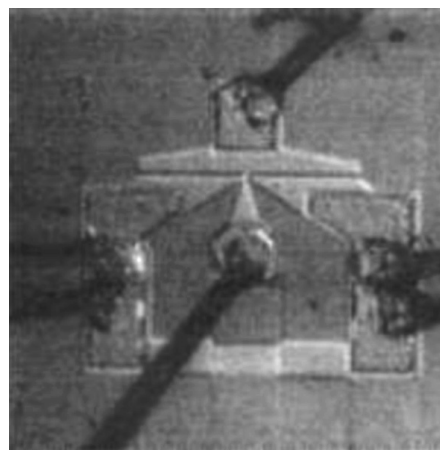


Рис. 10.7. Малошумящий транзистор на частоте 37 ГГц

Унифицированная конструкция и базовая технология изготовления малошумящих транзисторов в диапазоне частот 4–60 ГГц (с длиной затвора 0,3–0,35 мкм) позволяют производить малошумящие транзисторы на частоты 4, 12, 37, 60 ГГц, параметры которых на частотах 4–12 ГГц находятся на уровне зарубежных коммерческих транзисторов.

10.3.2. Зарубежные арсенид-галлиевые фабрики

Поскольку создание современного арсенид-галлиевого производства требует больших финансовых затрат, более 90% СВЧ-приборов для военных и коммерческих применений производятся на специализированных фабриках (FAB). К услугам разработчиков СВЧ-приборов эти фабрики предлагают широкий спектр технологий с различными опциями и широкий набор базовых библиотечных компонентов.

Ниже рассмотрим технологические особенности базовых процессов и основные характеристики изготавливаемых СВЧ-приборов фабрик WIN Semiconductors (Тайвань) и европейской United Monolithic Semiconductors corporation (UMS).

WIN Semiconductors

На рис. 10.8 представлена сводная диаграмма технологических возможностей этой арсенид-галлиевой фабрики. Здесь производятся приборы для широкого частотного спектра: от DC (< 1 ГГц) до 100 ГГц.

На рис. 10.9 представлена дорожная карта развития (roadmap) этой фабрики применительно к монолитным СВЧ ИС на основе НВТ- и НЕМТ-элементов. Для заказчика фабрика предлагает 10 различных технологических процессов с различными встроенными опциями. Следует обратить внимание, что с 2014 г. эта фабрика освоила 0,25-мкм технологический процесс изготовления высоковольтных GaN НЕМТ (28 В) серии NP2500. Эта фабрика выполняет также технологические операции бампирования для сборки мощных СВЧ-модулей с использованием медной металлизации.

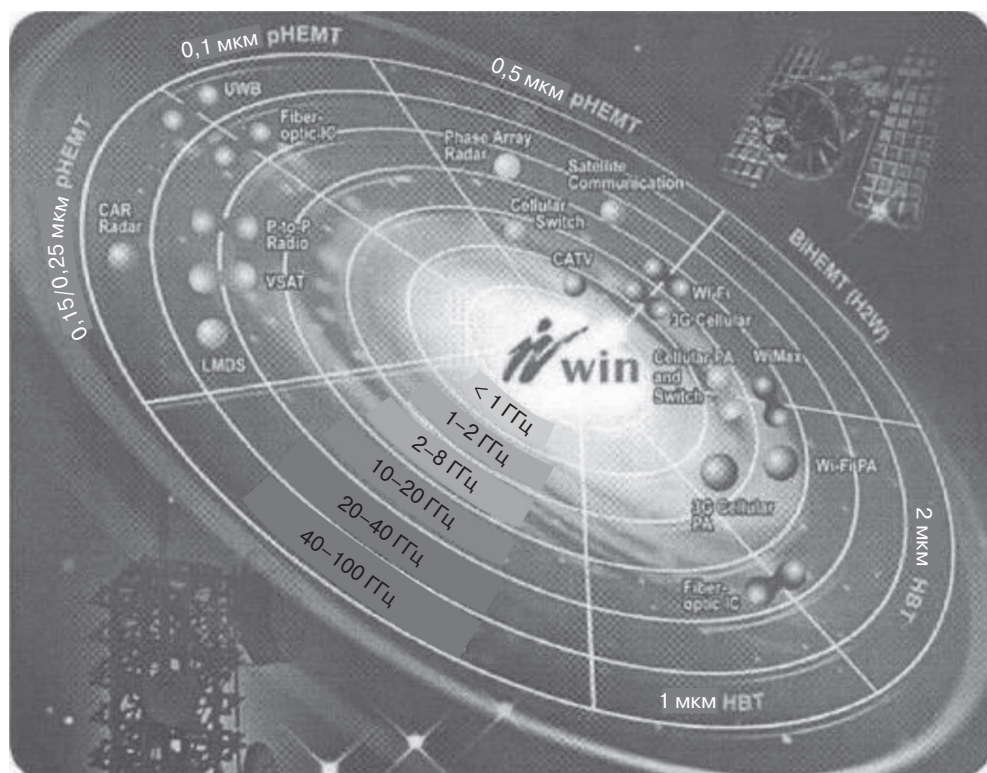


Рис. 10.8. Сводная диаграмма технологических возможностей WIN Semiconductors

United Monolithic Semiconductors corporation

Корпорация UMS развивает ряд эффективных технологий изготовления высококачественных маломощных и мощных монокристаллических СВЧ ИС и СВЧ-модулей для различных сфер применения: военных, автомобилестроения, космоса, телекоммуникаций и промышленного применения.

Одним из несомненных достоинств этой фабрики является высокий уровень и простота пользования дизайн-китами (Design Kits) и правилами проектирования (Design Manuals) – разработчики различных СВЧ-приборов и СВЧ монокристаллических схем достаточно легко осваивают процесс проектирования, причем специалисты UMS обеспечивают оперативную поддержку процесса разработки проекта на любой его стадии.

Кроме того, инженерная служба UMS предоставляет заказчикам дополнительные услуги – обучение основам проектирования под фаундри (foundry training), анализ и измерение изготовленных СВЧ-изделий непосредственно на пластине (DC, RF, анализ шумовых характеристик, измерение мощностных характеристик и др.). По желанию заказчика здесь можно провести и сборку в корпус изготовленных СВЧ-приборов.

Так же как и на фабрике WIN Semiconductors, здесь изготавливаются СВЧ-изделия для широкого спектра частот – от 1 до 100 ГГц.

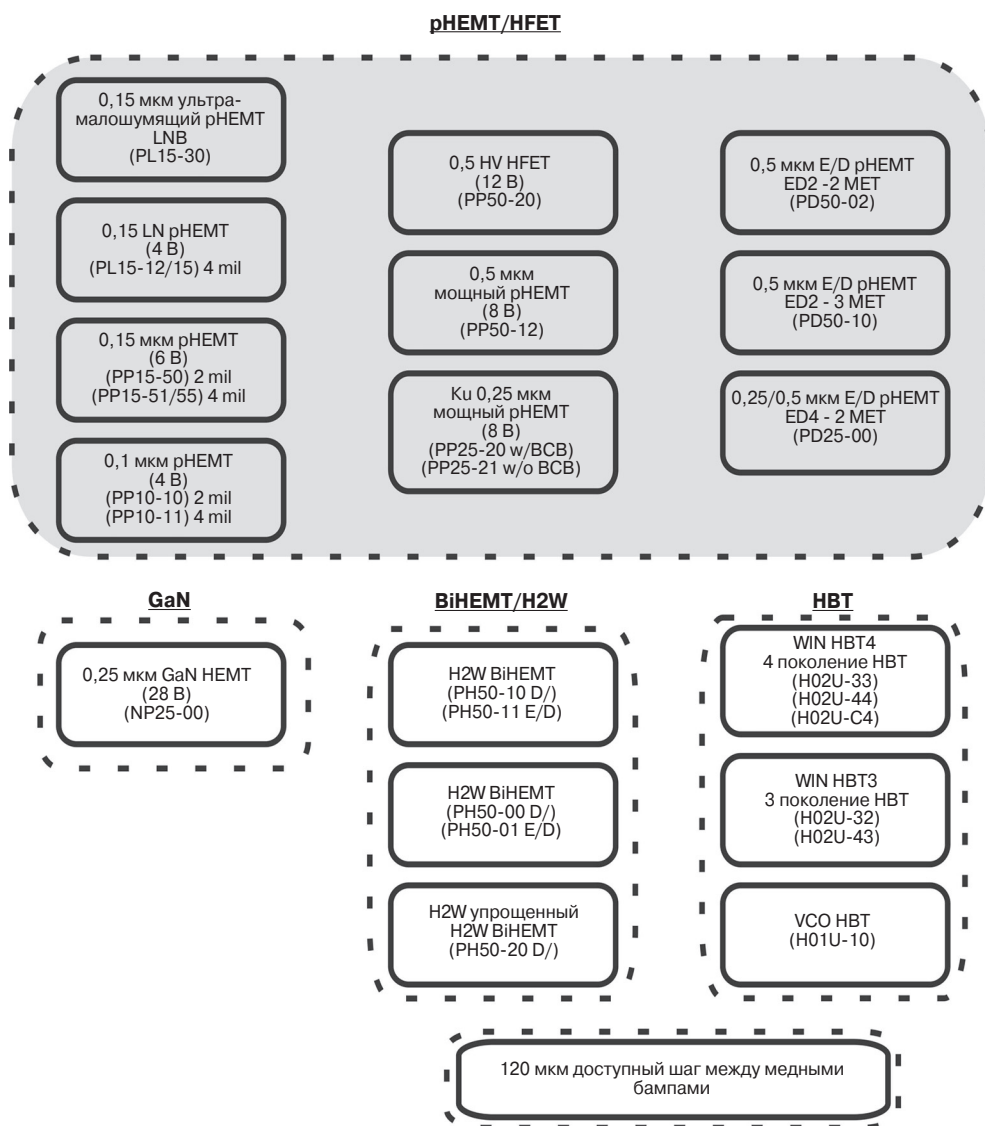


Рис. 10.9. Технологические возможности арсенид-галлиевой фабрики WIN Semi-conductors

На рис. 10.10 представлены основные технологические возможности производственных линий для всего частотного диапазона СВЧ-приборов. Используемые технологические процессы обеспечивают возможности изготовления встроенных в прибор МІМ-емкостей, индуктивностей, металлических резисторов, фильтров, трактов радиочастотной обработки сигналов.

В табл. 10.8 представлены детализированные для каждого из 13 технологических процессов значения основных технических характеристик СВЧ-приборов (плотность мощности, усиление, шумы и т.д.).

Таблица 10.8. Основные характеристики СВЧ-приборов, изготавливаемых на линии UMS

	PH25 мало- шумя- щий	PH15 мало- шумя- щий	PH10 мало- шумя- щий	PPH25 мощный	PPH25X мощный	PPH15 мощный	PPH15X_10 мощный	HB20P мощный	HB20S сверх- мощный	HB20M VCO	GH25_10 GaIn	HP07	BE5	
	рHEMT	рHEMT	рHEMT	рHEMT	рHEMT	рHEMT	рHEMT	НВТ	НВТ	НВТ	HEMT	MESFET	Shottky	
Удельная мощность	250 мВт/мм	300 мВт/мм	250 мВт/мм	700 мВт/мм	900 мВт/мм	600 мВт/мм	750 мВт/мм	3,5 Вт/мм	5 Вт/мм	2 Вт/мм	4 Вт/мм	400 мВт/мм	—	
Длина затвора	0,25 мкм	0,15 мкм	0,1 мкм	0,25 мкм	0,25 мкм	0,15 мкм	0,15 мкм	2 мкм	2 мкм	2 мкм	0,25 мкм	0,7 мкм	1 мкм	
$I_{ds}(g_{max})/$ $I_{ds,z}/k$	200 мА/мм 500 мА/мм	220 мА/мм 550 мА/мм	280 мА/мм	200 мА/мм 500 мА/мм	170 мА/мм 450 мА/мм	300 мА/мм 600 мА/мм	350 мА/мм 550 мА/мм	0,3 мА/мм ²	0,2 мА/мм ²	0,3 мА/мм ²	750 мА/мм 900 мА/мм	300 мА/мм 450 мА/мм	—	
V_m/V_c	> 6 В	> 4,5 В	> 5 В	> 12 В	> 18 В	> 8 В	> 12 В	> 16 В	> 35 В	> 14 В	> 100 В	> 14 В	< 5 В Аноде/ катоде	
Частота отсечки	90 ГГц	110 ГГц	130 ГГц	50 ГГц	45 ГГц	75 ГГц	65 ГГц	25 ГГц	12 ГГц	30 ГГц	30 ГГц	15 ГГц	3 ТГц	
V_p	0,8 В	0,7 В	0,45 В	0,9 В	0,9 В	0,9 В	1,0 В	—	—	—	3,0 В	4,0 В	—	
G_{Tmax}/β	560/мм	640/мм	750/мм	450/мм	400/мм	550/мм	420/мм	65	50	60	300/мм	110/мм	—	
Шум/ усиление	0,6 дБ/ 13 дБ 10 ГГц 2, дБ/ 8 дБ 40 ГГц	0,5 дБ/ 14 дБ 10 ГГц 1,9 дБ/ 6 дБ 60 ГГц	2,3 дБ/ 4,5 дБ 70 ГГц	0,6 дБ/ 12 дБ 10 ГГц	—	1,6 дБ/ 7 дБ 40 ГГц	1,8 дБ/ 5 дБ 40 ГГц	—	—	—	—	1,8 дБ/ 11 дБ 15 ГГц	—	—

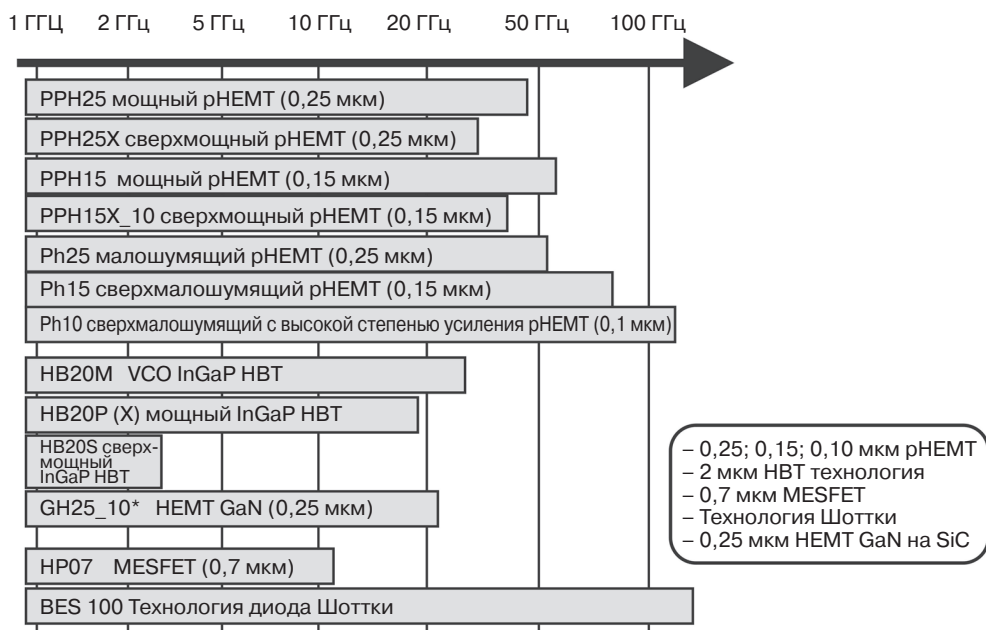


Рис. 10.10. Основные технологические возможности производственных линий UMS

Одним из привлекательных моментов сотрудничества разработчиков СВЧ-изделий с компанией UMS является возможность работы в режиме «мультипроекта» (Multi Project Wafer – MPW). Это значит, что заказчик (разработчик СВЧ-изделия) «выкупает» не всю пластину с изготовленными кристаллами, а только одну из ее частей. На других частях пластины фабрика изготавливает кристаллы, разработанные другими участниками (заказчиками) MPW по своим проектам, что позволяет существенно сэкономить на стоимости разработки изделия. Запуски таких пластин по базовым процессам фабрика выполняет регулярно – шесть раз в год (раз в два месяца). Для нестандартных требований заказчика также существует возможность работы в режиме MPW, при этом заказчик оплачивает только «свою» часть пластины.

10.4. Технология мощных СВЧ-транзисторов и СВЧ МИС на основе нитрида галлия

10.4.1. Состояние и тенденции развития технологии мощных СВЧ-транзисторов и СВЧ МИС

Развитие технологии СВЧ-приборов на широкозонных полупроводниковых материалах привело к освоению конструкции мощных СВЧ транзисторов и монолитных интегральных схем (МИС) на нитриде галлия (GaN) в серийном промышленном производстве. Ниже рассмотрим уровень достигнутых в мире технических параметров GaN-транзисторов и МИС, а также транзисторных усилителей высокого уровня мощности (10–100 Вт и более) на их основе и основные тенденции развития этого класса СВЧ-устройств.

Интерес разработчиков мощных полупроводниковых усилителей к GaN-транзисторам (а точнее, к транзисторам на основе гетероструктур AlGaIn/GaN) обусловлен рядом важных свойств широкозонных полупроводниковых соединений вообще и нитрида галлия в частности, представленных в сводной табл. 10.9.

Таблица 10.9. Свойства широкозонных полупроводниковых соединений [5]

Основные параметры полупроводниковых соединений	Si	AlGaAs/ InGaAs	SiC	AlGaN/ GaN	InP ГС
Ширина запрещенной зоны, эВ	1,1	1,4	3,2	3,4	1,35
Подвижность электронов, см ² /(В·с)	1350	8500	700	2000	10 000
Дрейфовая скорость насыщения электронов, × 10 ⁷ см/с	1,0	2,0	2,0	2,5	2,3
Концентрация электронов области 2D-электронного газа, см ⁻²	—	3 × 10 ¹²	—	(1–2) × 10 ¹³	4 × 10 ¹²
Критическая напряженность электрического поля, МВ/см	0,3	0,4	2,0	3,3	0,5
Теплопроводность, Вт/см·К	1,5	0,5	4,5	1,3	0,7

Здесь представлены основные параметры полупроводниковых соединений, используемых в технологиях изготовления СВЧ-приборов (Si, SiC, GaAs, GaN, InP).

Как известно, максимальная ширина запрещенной зоны полупроводникового материала обуславливает возможность работы транзистора при высоких уровнях внешних воздействий (температуры, радиации). Очень высокая концентрация электронов в области двумерного электронного газа в сочетании с приемлемой подвижностью электронов дает возможность реализации большой плотности тока в сечении канала транзистора и высокого коэффициента усиления. Максимальная критическая напряженность электрического поля позволяет реализовать пробивные напряжения в 100–300 В и поднять рабочее напряжение стока до 50–100 В, что в сочетании с высокой плотностью тока обеспечивает удельную выходную мощность промышленных GaN-транзисторов 3–10 Вт на 1 миллиметр ширины затвора (до 30 Вт/мм в лабораторных образцах), а это на порядок превышает удельную выходную мощность арсенид-галлиевых (GaAs) транзисторов. Проблемными моментами, сдерживающими дальнейшее развитие GaN-приборов, являются задача обеспечения эффективного теплоотвода от активной структуры и необходимость выращивания эпитаксиальных структур GaN на чужеродных (отличающихся по параметрам кристаллической решетки, тепловому расширению и т.д.) подложках из-за невозможности реализации высокоомной подложки собственно GaN.

Первые демонстрации эффективных транзисторных гетероструктур AlGaIn/GaN, показывающие их основные преимущества, относятся к 1991–1994 гг. В конце 1990-х гг. появляются первые образцы GaN МИС усилителей, одновременно формируются и начинают выполняться военные и государственные программы развития данного направления [5] – американская программа WBGSTI, позднее европейские MARCOS, TIGER, KORRIGAN, японская NEDO.

В то же время практически все ведущие мировые электронные компании, так или иначе связанные с производством GaAs-компонентов, начинают собственные инвестиции в технологию GaN-приборов. Эти инвестиции приносят свои плоды, и в 2006–2007 гг. появляются на рынке первые коммерческие GaN-продукты: корпусированные мощные транзисторы в диапазоне частот до 2–4 ГГц с выходной мощностью от 5 до 50 Вт (несколько позднее – до 120–180 Вт). Пионерами выхода на коммерческий рынок стали компании Eudyna, Nitronex, Cree и RFMIC, чуть позднее к ним присоединятся Toshiba, RFMD, TriQuint, OKI, NXP и ряд других компаний. В 2008 г. появляются первые коммерческие МИС (широкополосные усилители мощности до 6 ГГц) фирмы Cree, в 2009 г. компанией TriQuint анонсируются широкополосные 10 Вт МИС усилители с полосой 2–17 ГГц.

Основные параметры универсальных (не содержащих встроенных диапазоновых согласующих цепей) корпусированных GaN-транзисторов приведены в табл. 10.10.

Таблица 10.10. Основные параметры первых серийных GaN-транзисторов [5]

Производитель, серия	P_{out} , Вт	F_{max} , ГГц	G_{ss} , дБ	D_{eff} , %	V_{ds} , В
Eudyna EGNBxx	12–120	0,9–3,5	13–18	60	50
Cree Inc. CGHxx	10–120	1,3–5	16–19	60–70	28
Nitronex NPTBxx	5–180	1–6	15–20	65	48
RFMD RF393x	10–120	0,9–2,7	15–23	60–70	48
OKI KGF72xx	50	–	15	–	50
TriQuint TGA2023xx	6–100	20	8–15	55	28–40

Видно, что основной функциональный состав (5–8 типов от 10 до 120 Вт) и параметры транзисторов всех производителей близки, исключением являются транзисторы серии TGF2023 фирмы TriQuint, поставляемые в виде кристаллов и работоспособные до частот 20 ГГц и более. Универсальные корпусные транзисторы поставляются в малогабаритных металлокерамических фланцевых или SMD-корпусах, имеющих относительно малые паразитные емкости, и в зависимости от мощности и диапазона частот обеспечивают в непрерывном режиме полосу рабочих частот от 30% до октавы и более.

Свойства мощных «внутрисогласованных» транзисторов, выполняемых по различным технологиям, можно проиллюстрировать данными табл. 10.11, где приведены параметры выпускаемых серийно приборов уровня мощности 120 Вт, применяемых в системах связи стандарта W-CDMA в диапазоне 2 ГГц. Этот диапазон выбран намеренно, как «пограничный» между областями эффективного применения кремниевых и A_3B_5 -приборов.

Таблица 10.11. Основные параметры серийных GaN-транзисторов для систем связи стандарта W-CDMA [5]

Параметры GaN-транзисторов	Обозначение технологии, тип транзистора, фирма		
	Si LDMOS Freezcale MRF21120R6	GaAs MESFET Fujitsu FLL1200IU-2	GaN HEMT Cree CGH21120F
$P_{out}(CW, -1dB)$, Вт	120	100	50–60
$P_{out}(max)$, Вт	120	120	115
G_{SS} , дБ	11	11	15
$\Delta F(-1dB)$, МГц	150	90	350
$D_{eff}(@P_{max})$, %	35	45	60–70
$D_{eff}(@W-CDMA)$, %	20	20–25	35
V_{ds} , В	28	12	28
T_{jmax} , °C	200	175	225
R_n , °C/Вт	0,45	0,8	1,5
Размеры	41 × 10 мм (push-pull)	34 × 17,4 мм (push-pull)	20 × 10 мм (single)

Примечание. W-CDMA: $P_{out} = 20$ Вт, ACRL < -35 дБ.

Среди преимуществ GaN-прибора по сравнению с другими типами в этом применении очевидными являются более широкая полоса рабочих частот (в 2–4 раза) и высокий КПД стока, как в режиме максимальной мощности, так и при усилении сложных сигналов. Кроме того, указанные параметры реализуются в «одиночном» транзисторном каскаде, в то время как Si и GaAs транзисторы являются «двух-транзисторными сборками» (парами), требующими применения парафазных схем сложения мощностей, что значительно усложняет схему усилителя и увеличивает его массогабаритные параметры. Среди недостатков можно отметить «затянутость» динамической характеристики (компрессия усиления наблюдается при мощностях, в 2–3 раза меньших максимальной) и пока высокую цену прибора в расчете на 1 Вт выходной мощности.

Для сравнения возможностей применения GaN и GaAs транзисторов в схемах широкополосных усилителей мощности проведем простой анализ их удельных (т.е. отнесенных к 1 мм ширины затвора транзистора) параметров. Воспользуемся известными оценками для усилителя класса А максимальной выходной мощности P_{max} и оптимального (для достижения этой мощности) сопротивления нагрузки транзистора R_{opt} :

$$P_{max} = V_{ds} \times I_{max} / 8; \quad (10.1)$$

$$R_{opt} = 2 \times V_{ds} / I_{max}, \quad (10.2)$$

где V_{ds} – напряжение питания стока, I_{max} – максимальный ток канала открытого транзистора.

Из приведенных выражений несложно получить формулу для нового, предложенного в [5] параметра – удельного оптимального сопротивления нагрузки (R_x):

$$R_x = V_{ds}^2 / 4 \times P_x, \quad (10.3)$$

где P_x – удельная выходная мощность транзистора – параметр, которым широко оперируют в литературе.

Типовые удельные параметры GaN и GaAs HEMT транзисторов, полученные из анализа линейных эквивалентных схем транзисторов, приведенных в литературе и справочных материалах фирм-изготовителей, а также указанный выше параметр R_x сведены в табл. 10.12.

Таблица 10.12. Сравнительные характеристики параметров HEMT-транзисторов для технологий GaAs и GaN [5]

Параметры транзисторов	GaAs/pHEMT		GaN/HEMT	
	Типовые значения	TGF2021 (1 мм)	Типовые значения	TGF2023 (1,25 мм)
Удельная емкость затвор-исток (C_{gs}), пФ/мм	1,8–3	2,74	1,1–2	1,2
Удельная крутизна переходной характеристики (G_{ms}), мс/мм	200–400	303	100–300	110
Удельная емкость сток-исток (C_{ds}), пФ/мм	0,15–0,3	0,199	0,2–0,4	0,2
Удельная выходная мощность (P_x), Вт/мм	0,7	1,0	5	5
Напряжение питания сток-исток (V_{ds}), В	9	10	28	32
Удельное оптимальное сопротивление нагрузки (R_x), Ом·мм	29	26,6	39	54
Оптимальное (оценка) сопротивление нагрузки для выходной мощности 10 Вт (R_{10}), Ом	2	–	19	–

Здесь также указаны значения параметров конкретных серийно выпускаемых изделий (TGF2021 и TGF2023).

Из анализа приведенных данных можно сделать следующие выводы:

- удельные емкость затвор-исток и крутизна GaN транзисторов в 1,5–2 раза ниже, чем у GaAs транзисторов, что является скорее преимуществом первых с точки зрения широкополосного согласования, так как требует меньших коэффициентов трансформации в согласующих цепях;
- удельная емкость сток-исток, шунтирующая оптимальную нагрузку транзистора и затрудняющая построение выходной широкополосной согласующей цепи на частотах выше некоторой граничной частоты, у обоих классов транзисторов примерно одинакова;
- удельные оптимальные нагрузки транзистора (R_x) также оказываются близкими (несколько выше для GaN-транзисторов).

Приведенные соображения позволяют сделать обоснованное предположение о том, что многие проекты и технические решения в части схем и конструкций согласующих цепей, разработанные для GaAs-транзисторов и МИС, могут быть (с минимальными изменениями) применены для GaN-транзисторов с равной или на 20–50% большей шириной затвора, при этом в случае близкой длины затвора обоих типов активных структур будут получены те же полосовые, усилительные и массогабаритные параметры, но при выходной мощности в несколько раз большей. Это также подтверждается экспериментальными результатами [5]. В качестве иллюстрации возможности «миграции» технических решений на рис. 10.11 приведены расчетные АЧХ широкополосного усилительного каскада диапазона 4–8 ГГц, спро-

ектированного на GaN-транзисторе типа TGF2023-02 фирмы TriQuint с шириной затвора 2,5 мм и выходной мощностью 12 Вт, в котором в качестве варианта включена модель GaAs транзистора типа TGF2021-02 той же фирмы с шириной затвора 2 мм и выходной мощностью 2 Вт. Для получения близких АЧХ потребовалось лишь на 50% скорректировать эквивалентную индуктивность присоединения электрода затвора транзистора.

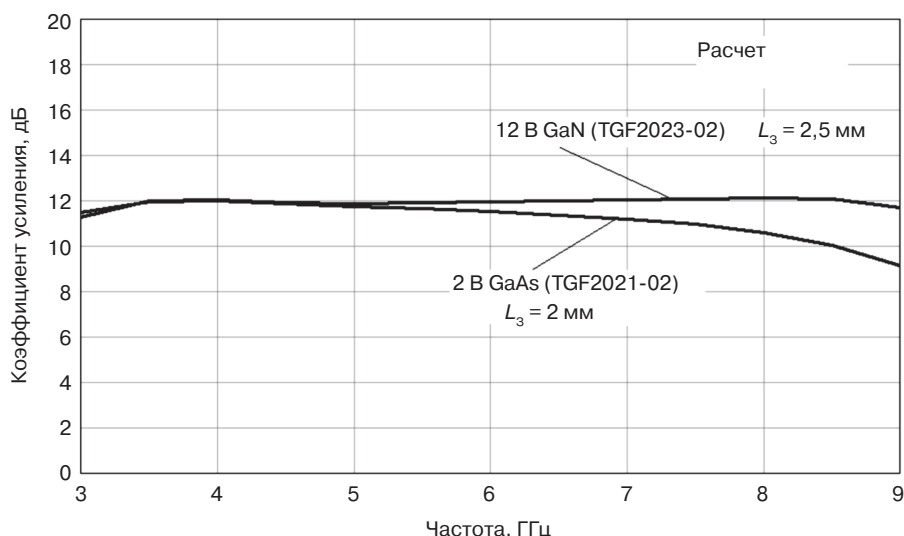


Рис. 10.11. АЧХ тест-схемы 4–8 ГГц с моделями GaN и GaAs-транзисторов

Коммерчески доступные GaN монокристаллические усилители в виде кристаллов либо в металлокерамических корпусах выпускаются компаниями Cree, MWT, TriQuint, RFMD и др.

Параметры и габариты некоторых типов МИС, как коммерчески доступных, так и описанных в публикациях, иллюстрирующие основные классы усилительных устройств и диапазоны частот применения, приведены в табл. 10.13.

Таблица 10.13. Основные классы усилительных устройств и диапазоны частот применения [5]

Тип	ΔF , ГГц	P-3 дБ, Вт	G_{SS} , дБ	PAE, %	Конструкция
CMPA2560025F Cree Inc.	2,5–6,0	25–37	23–27	> 30	Корпус МПЛ 13 × 13 мм
MGA-495940-02 MwT	4,9–5,9	10	12	–	Корпус QFN
HRL Lab.	75–92	> 0,5	11–14	> 17	Кристалл 3,4 × 1,3 мм
BAE Systems	4–18	3,2–4,4	10	16	Кристалл 4,2 × 4,9 мм
ALCATEL, THALES, UNC, QinetiQ, XLIM	8–10	> 30 (58 max)	13–16	> 33 (38 max)	Кристалл 4,5 × 4,0 мм
TriQuint	0,03–3	8–10	–	38	Корпус МПЛ 17 × 12 мм
TriQuint	2–17	8–12	–	20	Кристалл

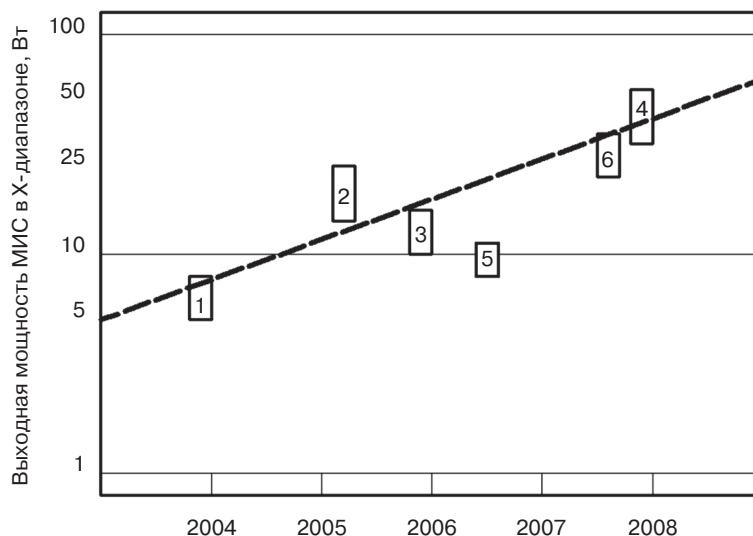


Рис. 10.12. Параметры GaN МИС X-диапазона

По сравнению с серийно выпускаемыми GaAs МИС новые изделия имеют в 2–10 раз большую выходную мощность и сравнимый либо больший КПД при одинаковых или меньших размерах кристалла. Номенклатура выпускаемых GaN усилительных МИС пока в десятки (если не в сотни) раз меньше, чем GaAs МИС. В качестве иллюстрации (рис. 10.12) темпов совершенствования параметров GaN МИС можно привести хронологию развития GaN МИС выходных усилителей X-диапазона для радарных систем с активными фазированными решетками, большое внимание которым уделяют военные в связи с тем, что параметры таких МИС (в первую очередь КПД и выходная мощность) определяют важнейшие тактико-технические параметры таких радаров. Здесь приведены следующие источники информации:

1. Behtash R. et al. Coplanar AlGaIn/GaN HEMT power amplifier MMIC at X-band // 2007 IEEE MTT Symposium Digest. — P. 1657–1659 [6].
2. Fanning D.M. et al. 25 W X-band GaN on Si MMIC // GaAs Mantech Conference Proceedings. — 2005 [7].
3. Klockenhoff H. et al. A Compact 16 Watt X-Band GaN-MMIC Power Amplifier // IEEE MTT-S Digest. — 2006. — P. 1846–1849 [8].
4. Piotrowicz S. et al. State of the Art 58W, 38% PAE X-Band AlGaIn/GaN HEMTs microstrip MMIC Amplifiers // IEEE Compound Semiconductor IC Symposium. — 2008 [9].
5. Chen T. et al. X-Band 11W AlGaIn/GaN HEMT Power MMICs // EwMIC Conference Proceedings. — 2007. — P. 162–164 [10].
6. Costrini C. et al. A 20 Watt Micro-strip X-Band AlGaIn/GaN HPA MMIC for Advanced Radar Applications // EwMIC Conference Proceedings. — 2008. — P. 1433–1436 [11].

На рис. 10.13 показаны конструкции кристаллов 40-ваттного GaN МИС усилителя X-диапазона и мощного промышленного GaAs усилителя типа МААРGM0079 фирмы M/A Com (пропорции размеров кристаллов соблюдены) [5].

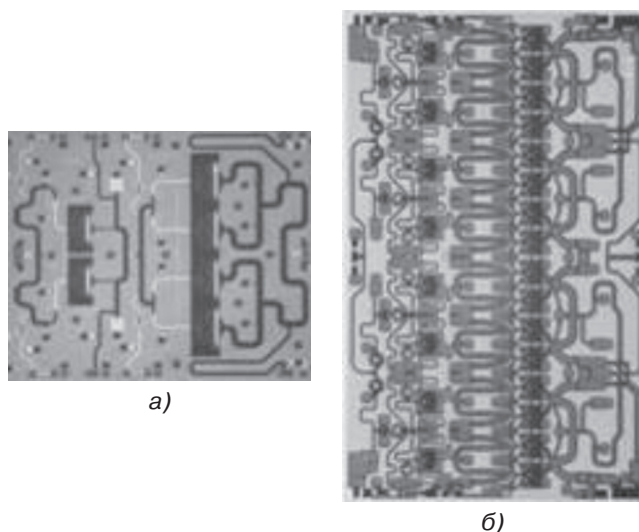


Рис. 10.13. Примеры топологических решений конструкций GaN МИС усилителей: GaN 10 ГГц/40 Вт (18 мм²) [9] (а); GaAs 10 ГГц/20 Вт (41 мм²) (б)

Видно, что конструкция GaN усилителя существенно проще и имеет в 2,3 раза меньшие размеры, причем есть возможность дальнейшего увеличения выходной мощности GaN МИС в X-диапазоне.

Исследования временной стабильности параметров и надежности GaN транзисторов, проводившиеся при отработке промышленных технологий, привели к достижению приемлемых показателей надежности для серийных приборов. В качестве примера на рис. 10.14 приведена кривая Аррениуса для мощных GaN-транзисторов на кремниевой подложке фирмы Nitronex [5]. Показано, что при температуре активной зоны кристалла 150 °С среднее время наработки до отказа превышает 10⁷ часов, энергия активации $E_a = 2,0$. При допустимой рабочей температуре кристалла $T_j = 200$ °С средняя наработка до отказа составляет 10⁵ часов. Продемонстрирована также стойкость приборов к рассогласованию нагрузки до КСВН = 10 в режиме большого сигнала. Быстрое (в течение нескольких часов) разрушение возникает в современных GaN-транзисторах при температурах активной зоны 320–350 °С.

Полученные показатели пока уступают показателям надежности серийных GaAs рНЕМТ транзисторов (средняя наработка на отказ при $T_j = 200$ °С составляет 10⁶ часов, температура разрушения 370–390 °С [13]), но дальнейшее быстрое совершенствование технологии GaN приборов должно наверстать это отставание. Предполагаемые максимальные рабочие температуры для GaN транзисторов могут составлять 350–400 °С [14]. Рабочие параметры GaN транзисторов с шириной затвора 2,8 мм (выходная мощность 10 Вт) на подложке SiC при увеличении температуры кристалла до 300 °С исследованы в работе [15]. Малосигнальный коэффициент усиления при изменении температуры от 50 до 300 °С снижается на 6 дБ, выходная мощность насыщения на 1,5 дБ, максимальный ток канала и крутизна примерно в 2 раза.

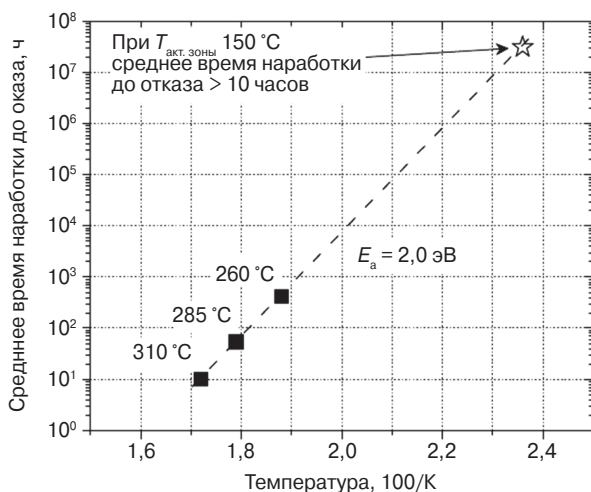


Рис. 10.14. Кривая Аррениуса GaN транзистора [5, 12]

Существенные преимущества GaN-транзисторов проявляются в упрощении конструкции и увеличении выходной мощности сверхширокополосных (с перекрытием по частоте более октавы) усилителей мощности. Параметры нескольких типов таких серийных приборов приведены в табл. 10.14.

Таблица 10.14. Параметры серийных приборов [5]

Тип	ΔF , ГГц	P-3 дБ, Вт	G_{ss} , дБ	PAE, %	V_{dc} , В
Aethercomm SSPA 0,5-3,0-50	0,5–3,0	70–100	31	13–19	50
Aethercomm SSPA 0,8-2,5-200	0,8–2,5	100–200	47	11–22	50
EMPower BBM3T6AMQ	0,96–3,0	> 160	56	23	28
Stealth Microwave SM2560-47GN	2,5–6,0	50	48	25	28

Габаритно-весовые характеристики широкополосных усилителей, использующих GaN-транзисторы, существенно превосходят таковые у GaAs-усилителей. При одинаковой выходной мощности и усилении габариты и масса (без радиатора охлаждения) GaN-усилителя в 2–4 раза меньше, чем у аналогичного GaAs-усилителя.

Одним из направлений применения GaN транзисторов является совершенствование характеристик импульсных твердотельных радаров в L-, S- и X-диапазонах. В работе [16] описан выходной широкополосный приемопередающий модуль АФАР, работающий в диапазоне частот от 8,7 до 11,5 ГГц, включающий четыре GaN МИС: маломощный входной усилитель с коэффициентом шума 1,8 дБ и стойкостью к непрерывному входному сигналу 4 Вт, предварительный усилитель с выходной линейной мощностью 4–5 Вт и два выходных усилителя с выходной мощностью 14–20 Вт каждый. Модуль в целом (на выходе циркулятора) обеспечивает выходную мощность в режиме передачи 20 Вт и коэффициент шума в режиме приема 3 дБ.

Специалистами института NEDI (Нанкин, КНР) продемонстрирован четырехкристальный внутрисогласованный транзистор X-диапазона с выходной мощностью в непрерывном режиме 110 Вт и КПД 38% [17]. В S-диапазоне (2,9–3,3 ГГц) уровень импульсной выходной мощности GaN транзисторов приближается к 1000 Вт при КПД более 50% [18] для импульсного режима со скважностью 10 и длительностью импульса 200 мкс. При этом наклон вершины импульса за 200 мкс составил 0,31 дБ, а дрейф фазы менее 4°.

Большой интерес разработчики GaN-приборов проявляют к широкополосным системам связи, в первую очередь к применению GaN-транзисторов в базовых станциях стандартов W-CDMA, UMTS и WiMAX.

Развитие этого направления идет как за счет совершенствования параметров самих GaN-транзисторов [19] (увеличение выходной мощности и КПД, подавление «эффектов памяти»), так и за счет применения известных схем повышения эффективности усилителей базовых станций – использование схем Доггерти [20], применение различных режимов высокоэффективного усиления (режимы класса E [21], F [22] и др.). При достаточно высокой цене самих GaN-транзисторов их коммерческий успех связывают с такими преимуществами на системном уровне, как:

- простота (и дешевизна) схемотехнической реализации мощных усилителей;
- простота получения широких полос усиления, перекрытие одним мощным усилителем нескольких поддиапазонов станции;
- снижение энергопотребления базовой станции и связанных с ним издержек;
- уменьшение сложности и стоимости систем охлаждения.

Активно осваиваются GaN-приборами диапазоны 2,1; 3,5; 5–6 ГГц. При мощностях усилителей уровня 10 Вт в диапазоне 2 ГГц продемонстрированы значения КПД более 70–80%, при уровне 100 Вт реализованы КПД 55–65%.

Одним из очевидных применений GaN транзисторов и МИС являются системы радиопротиводействия, традиционно перекрывающие многооктавные полосы частот в дециметровом и сантиметровом диапазонах. Одной из целевых задач, например, американской программы WBGSTI была разработка МИС усилителя в диапазоне 2–10 ГГц с выходной мощностью 15 Вт и на ее основе усилительного модуля с выходной мощностью 100 Вт [23]. Компанией TriQuint разработан монолитный усилитель с полосой 2–17 ГГц и выходной мощностью 8–12 Вт [24]. Отметим, что современные серийные GaAsМИС в этом диапазоне имеют выходную мощность более 1 Вт.

В России исследования и разработки эпитаксиальных структур нитрида галлия и транзисторов на их основе проводятся рядом предприятий и научных учреждений. Среди них ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, ОАО «Светлана-Рост», ФГУП «НПП «Пульсар», ФГУП «НПП «Исток», ЗАО «Элма-Малахит», ИСВЧПЭ РАН, ФГУП «Гиредмет», ИФП РАН и ряд других организаций [25]. Разработаны образцы мощных и малошумящих GaN-транзисторов, находящиеся в стадии лабораторных исследований. В промышленном освоении приборов, к сожалению, российские предприятия пока значительно отстают от ведущих зарубежных компаний.

В период с 2006 по 2007 г. были решены основные производственные и технологические проблемы, не позволявшие GaN-транзисторам и монолитным интегральным схемам СВЧ выйти на коммерческий рынок. С этого момента началось

активное внедрение технологии нитрида галлия в СВЧ промышленность, как военную, так и коммерческую. Темпы промышленного освоения новой технологии существенно (в 2–3 раза) превышают темпы, которыми развивались технологии Si- и GaAs-приборов. В ближайшее десятилетие частотный диапазон 1–50 ГГц станет ареной серьезной борьбы двух промышленных технологий мощных твердотельных интегральных схем, практически равных по частотным и усилительным свойствам, одна из которых обладает серьезными преимуществами в параметрах (GaN), другая (GaAs) – в себестоимости и уровне освоенности в массовом производстве.

10.4.2. Широкополосные транзисторные усилители мощности СВЧ-диапазона

СВЧ-усилители мощности на основе транзисторов и монолитных интегральных схем (МИС), во многих радиотехнических системах определяют важнейшие тактико-технические параметры системы, такие как излучаемая и потребляемая мощность, ширина полосы рабочих частот, габариты и масса, надежность и стоимость. Твердотельные СВЧ-усилители мощности вообще, а широкополосные приборы в особенности часто являются «критическим звеном» аппаратуры. Рассмотрим мировой уровень и направления развития специфической группы СВЧ-усилителей – широкополосных транзисторных усилителей мощности непрерывного режима.

К категории широкополосных усилителей относятся приборы, имеющие относительную ширину полосы рабочих частот более 40% (перекрытие по частоте – отношение верхней и нижней границ диапазона от 1,4 : 1 и более, вплоть до нескольких декад). От своих более узкополосных «собратьев» широкополосные приборы отличаются следующими конструктивными особенностями:

- сложная схема построения выходного каскада. Возможности широкополосного согласования активного элемента (транзистора) существенно ухудшаются с ростом его выходной мощности (и как следствие – ширины затвора, емкостей активной структуры), что часто приводит к необходимости применения многоканальных сумматоров мощности, усложняющих конструкцию прибора и вносящих дополнительные потери;
- использование в качестве активных элементов транзисторов с малыми дополнительными реактивностями (кристаллов дискретных транзисторов и МИС в средней и верхней части сантиметрового диапазона и МИС в миллиметровом диапазоне и корпусных транзисторов в дециметровом и нижней части сантиметрового диапазона);
- необходимость применения дополнительных схемотехнических мер подавления отраженных волн. При согласовании в широкой полосе невозможно получить низкий уровень отраженной от входа транзистора волны использованием реактивных согласующих цепей (СЦ), поэтому применяют схемные «излишества» в виде реактивно-диссипативных СЦ, уменьшающих усиление каскада, а также дополнительные обратные связи, ухудшающие и усиление, и выходную мощность, и КПД каскада, квадратурных схем сложения, увеличивающих габариты и усложняющих конструкцию прибора, дополнительных схем распределенного усиления, ухудшающих КПД.

Названные особенности приводят к тому, что электрические параметры широкополосных приборов оказываются заметно хуже, чем у узкополосных усилителей, а габариты и стоимость — заметно (иногда в разы) выше.

Тем не менее имеется целый ряд систем, в которых применение широкополосных усилителей необходимо. Это системы радиоэлектронного подавления (РЭП), сверхширокополосная локация, аппаратура тестирования на электромагнитную совместимость, специальные системы передачи данных, измерительная техника.

В силу своей сложности широкополосные усилители мощности являются и определенным «двигателем» полупроводниковых СВЧ-технологий в попытках создать все более мощные и широкополосные базовые интегральные элементы для построения этих приборов [26].

Из имеющегося широкого спектра современных полупроводниковых технологий и материалов [27, 28] при промышленном производстве мощных СВЧ дискретных и монолитных компонентов непрерывного режима, пригодных для использования в широкополосных усилителях, наиболее часто используются технологии, приведенные в табл. 10.15. Однако в ней не приводятся данные о выходных мощностях внутрисогласованных транзисторов, содержащих внутри корпуса цепи согласования на тот или иной конкретный участок диапазона частот и не пригодных для построения широкополосных усилителей мощности, а также приборов на фосфиде индия, которые пока трудно отнести к категории мощных. Рассмотрим более подробно состояние этих технологий.

Таблица 10.15. Промышленные технологии мощных СВЧ-транзисторов и МИС

Технология	Типы электронных СВЧ-компонентов	Диапазон частот, ГГц	Диапазон выходных мощностей, Вт	Типовой КПД транзисторов, %	Напряжение питания, В
Si LDMOS	Универсальные корпусные транзисторы	0–2	5–15	60	28
GaAs MESFET	Универсальные корпусные транзисторы	0–14	до 14,5	40	8–10
GaAs HiFET	Универсальные корпусные транзисторы	0–2,5	1–8	35	14–28
GaAs HFET	Транзисторы в виде кристаллов и в SMD-корпусах	до 10,5	до 10	50	8
GaAs pHEMT	Универсальные корпусные транзисторы, транзисторы в виде кристаллов и в SMD-корпусах, МИС в виде кристаллов и в различных корпусах	0–50	до 15	55	8–10
GaN P HBT	Универсальные корпусные транзисторы и МИС X-диапазона	до 10,5	до 10	40	9
SiC MESFET	Универсальные корпусные транзисторы, транзисторы в виде кристаллов	0–4	до 60	40	48
GaN HEMT	Универсальные корпусные транзисторы, транзисторы в виде кристаллов и в SMD-корпусах, МИС в виде кристаллов и в различных корпусах	0–20	до 100	60	28–50

Кремниевые полевые транзисторы с боковой диффузией (Si LDMOS) прочно заняли нишу базовых элементов в широкополосных усилителях с частотами до 1000 МГц. Приборы по данной технологии выпускаются компаниями Freescale Semiconductor, Sirenza Microdevices, PolyFET, NXP и др. Отличаются низкой ценой при массовом производстве, высоким КПД, высокой допустимой рабочей температурой кристалла (200 °С). В то же время имеют низкие предельные рабочие частоты (до 3,5 ГГц) и существенно более высокие (на порядок и более), чем приборы других технологий, удельные емкости активной структуры, что создает серьезные трудности их широкополосного согласования.

Арсенид-галлиевые полевые транзисторы с однородным легированием (GaAs MESFET), в прошлом веке являвшиеся наиболее массовым строительным материалом широкополосных усилителей СВЧ-диапазона, постепенно утратили свои позиции, будучи вытесненными арсенид-галлиевыми псевдоморфными гетероструктурными полевыми транзисторами (GaAs pHEMT). Кристаллы дискретных MESFET-транзисторов в настоящее время выпускаются компаниями Sumitomo Electric (традиционные серии FLC, FLX, FLK фабрики Fujitsu), Excelcis. Остаются в производстве несколько серий корпусных транзисторов нижней части сантиметрового диапазона (например, популярные модели MGF0910A, MGF0911A компании Mitsubishi Electric). Широкая номенклатура МИС мощных широкополосных усилителей, выпускаемых ранее компанией M/A Com (серия МАAPGM-xxx), снята с производства в связи с ликвидацией самого производства. Отличаются высокой надежностью, высокой линейностью передаточной характеристики, но уступают pHEMT-транзисторам по частотному диапазону, КПД, усилению. Имеют рабочие температуры кристалла до 175 °С и удельную выходную мощность 0,4–0,6 Вт/мм. Мощные транзисторы и МИС по этой технологии выпускаются и рядом российских производителей (ФГУП «НПП «Пульсар», ФГУП «НПП «Исток», ОАО «Октава»).

Отдельной веточкой некогда могучего дерева MESFET-технологии является достаточно редкая технология **высоковольтных арсенид-галлиевых MESFET полевых транзисторов**. Здесь основным серийным производителем приборов является компания AMCOM Communications. В силу высоковольтности и малых емкостей активной структуры хорошо подходят для использования в широкополосных усилителях, но частотный диапазон ограничен значениями 2,5–3 ГГц.

GaAs pHEMT-транзисторы до середины текущего десятилетия были самым массовым строительным материалом в классе широкополосных приборов. Существенное снижение стоимости приборов, изготавливаемых по этой технологии с размерами затвора 0,1–0,25 мкм, ставшее следствием промышленного освоения процессов обработки пластин диаметром до 150 мм [29], и достижение высокого процента выхода годных схем распространило эти приборы практически во все сектора применения, от мобильных телефонов и базовых станций до радаров, систем РЭП и систем связи миллиметрового диапазона. Эта технология стала стандартной и предоставляется практически всеми фирмами, выполняющими услуги по контрактному производству (foundry) МИС СВЧ. Использование этой технологии позволило наладить серийный выпуск монолитных усилителей в диапазонах до 32 ГГц с мощностями до 4–10 Вт. Ведущими компаниями (TriQuint

Semiconductor, Excelics, Agilent Technologies, Hittite Microwave, Sumitomo Electric, RFMD, Mimix Broadband, UMS, Transcom и рядом других) выпускаются сотни типов мощных транзисторов и МИС сантиметрового и миллиметрового диапазонов в виде кристаллов, являющихся сегодня основным «кирпичиком» для построения широкополосных усилителей мощности на частотах выше 2 ГГц. Имеют высокое усиление и КПД, высокие граничные частоты, пригодны для работы в классе АВ. Рабочая температура кристалла до 150 °С, удельная выходная мощность до 1 Вт/мм.

Индий-галлий-фосфорные гетеробиполярные транзисторы и МИС (GaInP HBT) дополняют картину промышленных технологий мощных приборов. В сантиметровом диапазоне компанией United Monolithic Semiconductors (UMS) выпускаются два типа специализированных МИС 10-ваттных усилителей диапазона 8,5–11 ГГц для радаров с активной фазированной решеткой (СНА7010 и СНА8100), остальное присутствие этой технологии концентрируется на универсальных трактовых усилителях (gain-blocks) диапазона до 6 ГГц с мощностями менее 1 Вт.

Революционным направлением развития мощных компонентов СВЧ, родившимся в прошлом десятилетии и перешедшим в фазу промышленного производства в середине текущего, стало направление широкозонных полупроводниковых материалов (**карбида кремния SiC и нитрида галлия GaN**) и приборов на их основе [30–31, 23]. Физические основы этих технологий и их особенности более детально рассмотрим в последующих разделах этой главы, а здесь остановимся на промышленных аспектах их применения.

Карбид-кремниевые полевые транзисторы с однородным легированием (SiC MESFET) по частотному диапазону применения «вклиниваются» между Si LDMOS приборами и приборами на арсениде галлия и нитриде галлия. Их основные преимущества – рабочие температуры кристалла до 255 °С, высокое рабочее напряжение, очень малые удельные емкости активной структуры. Удельная выходная мощность 2–3 Вт/мм. Недостатки – не очень высокий КПД, низкие предельные частоты, обусловленные малой подвижностью электронов в канале и высокая цена.

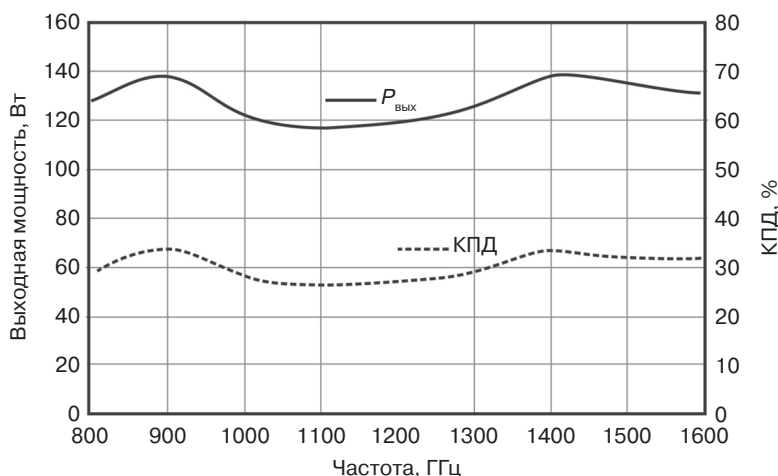


Рис. 10.15. Частотные характеристики выходной мощности и КПД усилителя PM0816

Серийно выпускаются только несколькими фирмами, в частности компанией CREE Inc. (серия CRF24-xxx) в виде кристаллов и в универсальных малогабаритных фланцевых корпусах. Используются для создания широкополосных усилителей мощности с высокими техническими характеристиками в диапазонах до 2,5 ГГц с выходной мощностью до 100–150 Вт и более, предназначенных для тяжелых условий эксплуатации. Частотная характеристика выходной мощности одного из разработанных в российском предприятии ЗАО «Микроволновые системы» усилителей с выходной мощностью более 100 Вт и КПД более 26% в диапазоне частот 0,8–1,6 ГГц [32] приведена на рис. 10.15.

Нитрид-галлиевые гетероструктурные полевые транзисторы (GaN HEMT) и МИС на их основе, освоенные в серийном производстве компаниями Cree Inc., TriQuint Semiconductor, Sumitomo Electric, Nitronex, RFMD, открыли новую страницу в совершенствовании параметров мощных широкополосных усилителей СВЧ-диапазона. В этой технологии соединяются преимущества, важные для проектирования современных РЛС и систем связи, – высокое напряжение питания (28–50 В); высокий КПД (более 60%); возможность работы в классе АВ с малой начальной рассеиваемой мощностью; частотный диапазон до 20 ГГц (в образцах с шириной затвора 0,1 мкм – до 150 ГГц); высокое усиление, малые емкости активной структуры, максимальная из существующих технологий удельная выходная мощность на единицу ширины затвора (более 5 Вт/мм²). К разряду недостатков серийных приборов можно отнести «затянутую» динамическую характеристику (снижение коэффициента усиления транзистора начинается при выходной мощности существенно меньшей, чем максимальная) и несколько большую цену на единицу мощности, чем у хорошо освоенных GaAs-приборов. В качестве иллюстрации полученных сочетаний параметров «полоса частот – выходная мощность» на рис. 10.16 и 10.17 приведены конструкции и основные технические характеристики МИС усилителей мощности: СМРА0060025 фирмы Cree Inc. и TGA2570 фирмы TriQuint Semiconductor [26]. Полученные уровни выходной мощности по меньшей мере на порядок превышают те, что демонстрирует в этих диапазонах частот GaAs-технология.

Параметры и габариты некоторых типов промышленно выпускаемых МИС, иллюстрирующие основные классы усилительных устройств и диапазоны частот их применения, приведены в табл. 10.16.

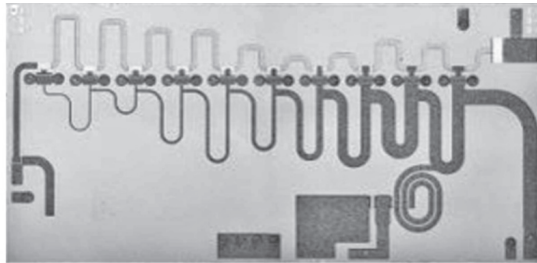
Таблица 10.16. Параметры серийных широкополосных монолитных усилителей

Тип	Диапазон частот, ГГц	Выходная мощность, Вт	Коэффициент усиления, дБ	КПД, %	Конструкция
<i>GaAs</i>					
TGA2570 TriQuint Semiconductor	2–18	1	16	8	Кристалл
TGA2501 TriQuint Semiconductor	6–18	2,5	24	20	Кристалл
EMP216 Excelics Semiconductor	6–18	2	20	18	Кристалл
<i>GaN</i>					
СМРА2560025F Cree Inc.	2,5–6,0	25–37	23–27	> 30	Корпус 13 x 13 мм

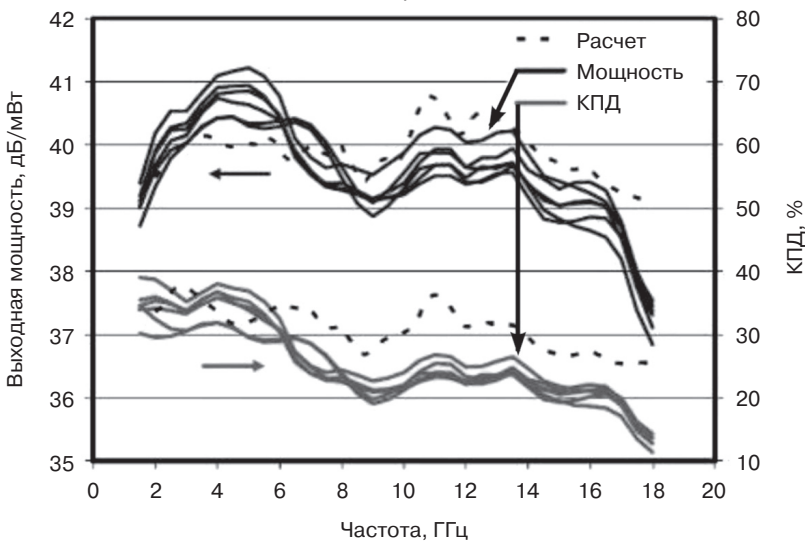
Таблица 10.16 (окончание)

Тип	Диапазон частот, ГГц	Выходная мощность, Вт	Коэффициент усиления, дБ	КПД, %	Конструкция
СМРА0060002F Cree Inc.	0,02–6,0	4	17	25	Корпус 13 × 13 мм
СМРА0060025F Cree Inc.	0,02–6,0	25	16–21	> 30	Корпус МПЛ 13 × 13 мм
TGA2540-FL TriQuint Semiconductor	0,03–3	9	19	40	Корпус 17 × 12 мм
TGA2570 TriQuint Semiconductor	2–17	8–12	10–14	20	Кристалл
RF3826 RFMD	0,02–2,5	9	13	40	Корпус SMD 5 × 6 мм

Таким образом, на рынке базовых технологий для построения широкополосных усилителей мощности сантиметрового диапазона складывается конкурентная ситуация между GaAs pHEMT и GaN HEMT технологиями, в которой техническими преимуществами владеет вторая, а производственными – пока первая.

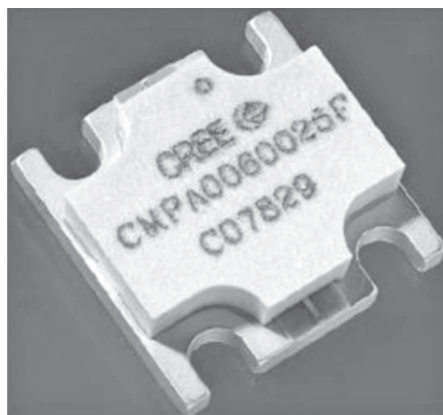


а)

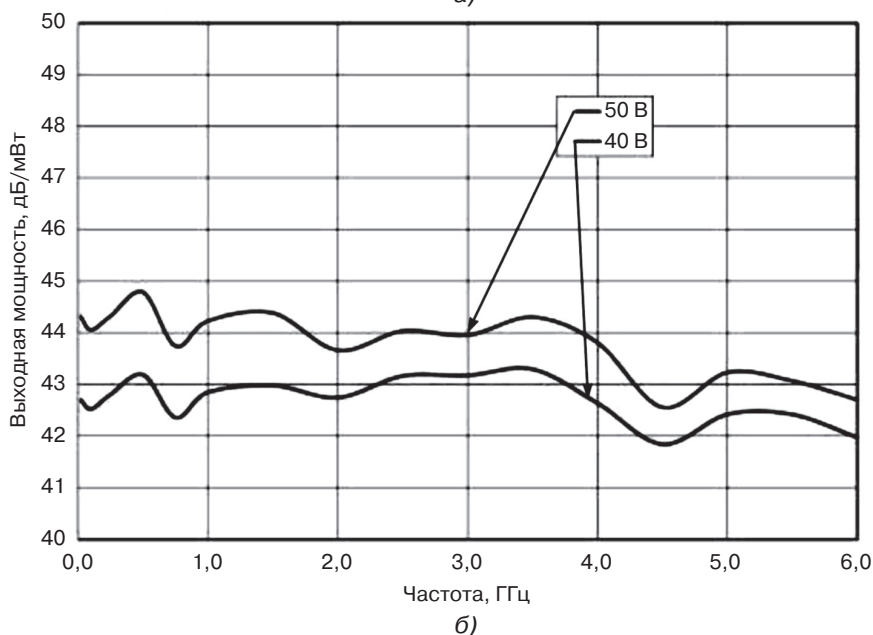


б)

Рис. 10.16. Конструкция (а) и характеристики (б) монолитного усилителя СМРА0060025 фирмы Cree Inc.



а)



б)

Рис. 10.17. Общий вид корпуса (а) и характеристики (б) монолитного усилителя TGA2570 фирмы TriQuint Semiconductor

Итак, из всего вышесказанного можно сделать следующие выводы:

- свойства GaAs- и GaN-транзисторов с одинаковыми размерами затвора с точки зрения проектирования усилительных «кирпичиков» очень близки;
- многие проекты и технические решения в части схем и конструкций согласующих цепей, разработанные для GaAs-транзисторов и МИС, могут быть с минимальными изменениями применены для GaN-транзисторов с равной или на 20–50% большей шириной затвора, при этом в случае близкой длины затвора обоих типов активных структур будут получены те же полосовые, усилительные и массогабаритные параметры, но при выходной мощности в несколько раз большей и с большим КПД.

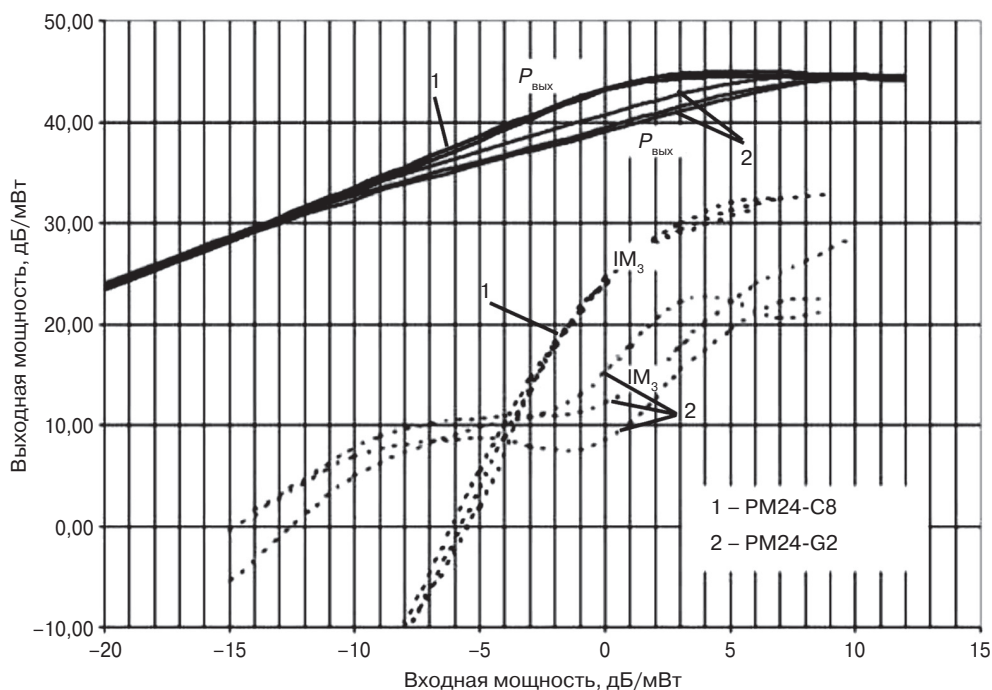


Рис. 10.18. Сравнение динамических и интермодуляционных характеристик GaAs- и GaN-усилителей мощности диапазона 2–4 ГГц

Различия становятся видны при более детальном рассмотрении параметров «второго уровня» (динамика уровней гармоник, фазовых и интермодуляционных искажений, способы отвода тепла, форма динамической характеристики и т.д.). В качестве примера на рис. 10.18 показаны динамические характеристики двух мощных усилителей диапазона 2–4 ГГц с выходной мощностью 20 Вт и усилением 43 дБ в линейном режиме – серийно выпускаемого ЗАО «Микроволновые системы» GaAs-усилителя типа PM24-C8 (кривые 1) и разработанного в 2009 г. GaN-усилителя типа PM24-G2 (кривые 2).

Усилитель на GaN-транзисторах имеет более плавное «вхождение» в режим насыщения и на 5–10 дБ более низкий уровень интермодуляции третьего порядка (IM3) при максимальной выходной мощности, однако при выходной мощности в 2–3 раза меньшей, чем максимальная, уже GaAs-усилитель становится явным лидером с точки зрения линейности. Отличаются усилители и по характеру фазо-амплитудных характеристик, и по тепловым режимам, и по ряду других параметров. Так что отличия проявляются в системных тонкостях применения приборов, в целом же сходство преобладает.

Сложность кристаллов МИС СВЧ-диапазона уже достигла определенного предела, связанного с ограничением максимальной площади кристалла (25–30 мм²), при которой он (при толщине 50–100 мкм) становится очень сложным для монтажных манипуляций, и процент выхода годных при монтаже МИС резко падает. Физическая ширина кристалла транзистора или МИС (что определяется физической шириной транзистора выходного каскада) при этом составляет 4–6 мм.

Максимальная мощность, снимаемая с кристалла (имеющего максимальную физическую ширину в своем классе приборов), таким образом, может быть оценена величинами, приведенными в табл. 10.17.

Таблица 10.17. Максимальная выходная мощность, снимаемая с кристалла МИС

Технология	Тип транзистора (МИС)	Физическая ширина кристалла, мм	Ширина затвора (выходного каскада), мм	Выходная мощность, Вт	Максимальная выходная мощность с кристалла, Вт (оценка)
GaAs MESFET	MAAPGM0079 M/A Com	8,15	–	20	20
GaAs HFET	TGF4260 TriQuint Semiconductor	2,4	9,6	5	
GaAs pHEMT	CHA7114 United Monolithic Semiconductor	3,31	–	8	
SiC MESFET	CRF24060D Cree Inc.	5,26	30	60	100
GaN HEMT	TGF2023-20 TriQuint Semiconductor	4,5	20	100	200

Если, например, принять максимальной физической ширину кристалла, равную 8 мм, то максимальная выходная мощность, снимаемая с кристалла МИС, конструктивно ограничена величинами, приведенными в последней колонке табл. 10.18. Оценка, конечно, приблизительная, плотность компоновки кристалла зависит и от сложности согласующих цепей, и от длины «пальца» встречно-штыревой структуры транзистора, оптимальной для конкретного диапазона частот, и от достигнутой удельной мощности, но представляется корректной.

Следующий шаг в наращивании выходной мощности транзисторных СВЧ-усилителей – разработка эффективных многоканальных сумматоров мощности. Для построения мощных широкополосных усилителей применяются разнообразные конструкции сумматоров, начиная с традиционных ответвителей Ланге и тандемных мостов и заканчивая многоканальными конструкциями на основе радиальных сумматоров и «сверхразмерного коаксиального волновода» с числом каналов 24–32 и эффективностью суммирования мощности 70–75% [26]. Последний под торговой маркой Spatium™ успешно применяется компанией CAP Wireless для построения усилителя типа СНРА0618-2 с полосой 6–18 ГГц и выходной мощностью 45 Вт на базе GaAs монокристаллических «кирпичиков» мощностью 2 Вт (рис. 10.19).

Наблюдаемый переход в конструкциях такого типа с GaAs на GaN-технологии при решении задачи отвода соответствующего количества тепла от активных элементов должен вывести широкополосные твердотельные приборы на уровень мощности, достигнутый широкополосными вакуумными усилителями на базе ламп бегущей волны непрерывного режима (100–400 Вт), что также будет являться знаковым моментом, который не мог быть достигнут ранее никакими схемными ухищрениями разработчиков твердотельных приборов.

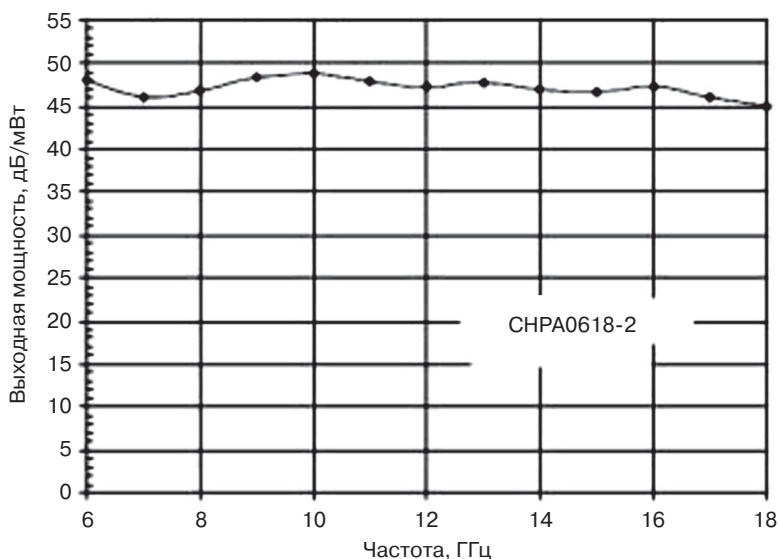


Рис. 10.19. Конструкция и характеристики усилителя SHPA0618-2 на основе «сверх-размерного коаксиального волновода»

Широкополосные усилители высокой мощности (от 10 Вт выходной мощности и выше) применяются в системах радиоэлектронного подавления, системах испытаний на электромагнитную совместимость, а также в некоторых новых радиолокационных системах, использующих широкополосные сигналы или сигналы с широкоим диапазоном перестройки частоты. Производством таких приборов за рубежом занимаются специализированные или частично специализированные на усилительной тематике компании, в числе которых Aethercomm, AML Communications, Amplifier Research, CAP Wireless, Cernex, CTT, EMPower RF Systems, Keragis, MilMega, Ophir RF, QuinStar Technology, RFCore, Stealth Microwave и некоторые другие. В России основной компанией, специализирующейся на разработке и производстве таких приборов, является ЗАО «Микроволновые системы» (г. Москва), несколько типов мощных широкополосных усилителей выпускают ФГУП «НПП «Исток» (г. Фрязино) и ОАО «Октава» (г. Новосибирск).

Параметры некоторых наиболее мощных промышленных образцов широкополосных усилителей приведены на рис. 10.20.

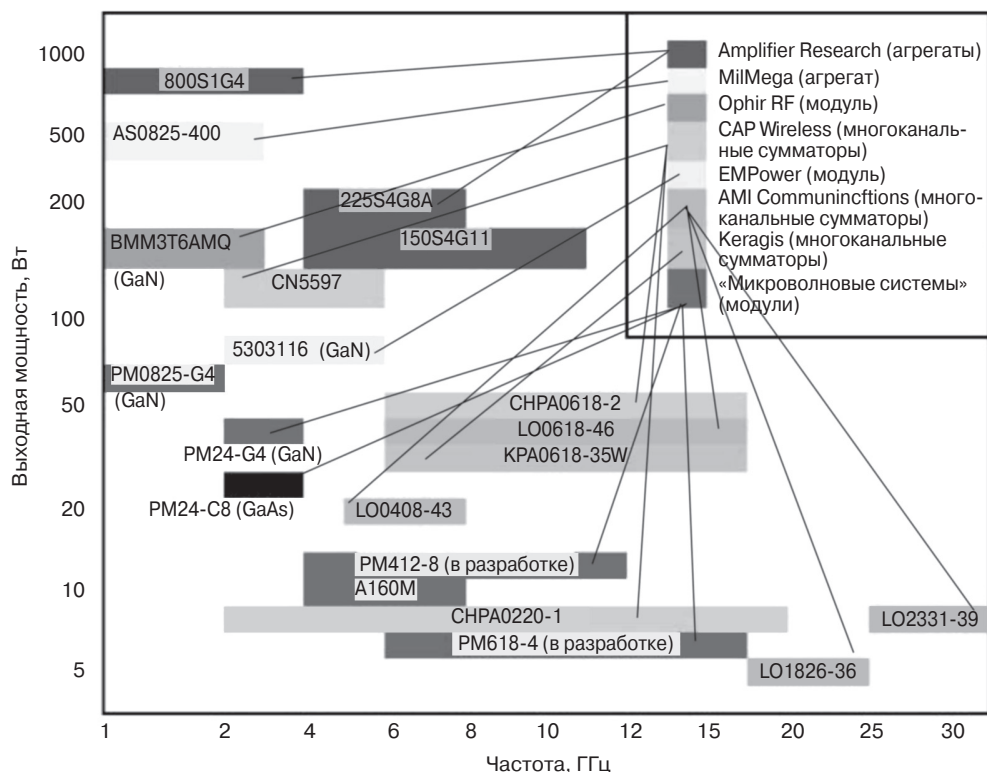


Рис. 10.20. Уровень выходной мощности непрерывного режима современных широкополосных транзисторных усилителей

На диаграмме приведены данные усилителей, имеющих различный конструктивный облик. Это и традиционные СВЧ-модули компактных габаритов, и описанные выше «экзотические» конструкции на основе объемных многоканальных сумматоров, и агрегаты («гибриды»), собранные в стационарные блоки с питанием от промышленной сети путем суммирования мощностей большого числа модулей.

Вместе с развитием технологий GaAs МИС за десятилетие выходная мощность сверхширокополосных усилителей диапазона 6–18 ГГц выросла в 10–20 раз при одновременном росте КПД с 3–5 до 10–15%. Освоение технологии GaN МИС в ближайшие годы позволит в этом популярном диапазоне сделать еще один скачок в уровне мощности в 3–4 раза и поднимет КПД приборов до 25% и более. В диапазоне от 1 до 4 ГГц использование GaN-транзисторов дает уже сегодня существенное сокращение габаритов и массы усилительных модулей, например упоминавшийся ранее экспериментальный GaN-усилитель PM24-G2 разработки ЗАО «Микроволновые системы» имеет по отношению к своему GaAs «собрату» PM24-C8 в 2 раза меньшие габариты и массу (рис. 10.21), на 40% меньшую себестоимость (несмотря на относительно высокие цены на сами GaN транзисторы) и на 30–40% меньшую мощность потребления от источника питания. При этом остальные параметры обоих приборов очень близки (за исключением «затянутой» динамики).



Рис. 10.21. Сравнение габаритов усилителей PM24-C8 (GaAs) и PM24-G2 (GaN)

С появлением на рынке корпусных GaN-транзисторов многие фирмы-производители мощных усилителей (Aethercomm, EMPower RF Systems, Ophir RF) вывели на рынок широкий спектр моделей в диапазонах 0,8–2,5; 1–3; 0,5–2,5 ГГц с выходными мощностями 50–100 Вт и габаритами, сравнимыми с более старыми GaAs приборами, имевшими в этих диапазонах мощности 20–25 Вт. Усилители в диапазоне выше 3 ГГц появились на рынке немедленно после освоения фирмой Cree Ind. МИС 25-ваттного усилителя в диапазоне частот 2,5–6 ГГц (табл. 10.16). Вслед за освоением МИС TGA2570 и транзисторов TGF2023 разработаны мощные широкополосные усилители верхней части сантиметрового диапазона. Высокие темпы развития этого направления могут быть проиллюстрированы рис. 10.12, на котором показана динамика развития GaN МИС, предназначенных для использования в качестве выходного усилителя в приемепередающих модулях АФАР диапазона 8–12 ГГц.

За пять лет интенсивных разработок мощность, снимаемая с кристалла МИС в этом диапазоне, выросла в 10 раз, при этом выходная мощность GaAs МИС аналогичного назначения, серийно выпускаемых фирмами TriQuint Semiconductor, UMS, RFMD, Mimix Broad-band, остается на достигнутом достаточно давно уровне 6–11 Вт.

10.5. Особенности технологий изготовления СВЧ-усилителей для радаров АФАР

10.5.1. GaN-усилители мощности для АФАР

Твердотельные СВЧ-усилители мощности и широкополосные усилители являются важным звеном аппаратуры радиолокационных систем для различных применений, поэтому к ним предъявляются особенно высокие требования. СВЧ-усилители мощности, построенные на основе мощных транзисторов или модулей, — это устройства, определяющие важнейшие параметры системы, такие как излучаемая и потребляемая мощность, ширина полосы рабочих частот, габариты и масса, долговечность, надежность и стоимость [34].

Революционным направлением в развитии мощных компонентов СВЧ стало направление широкозонных полупроводниковых материалов (карбида кремния SiC и нитрида галлия GaN) и приборов на их основе [35].

Совершенствование GaN-устройств на основе GaN-on-SiC HEMT-технологии идет в следующих направлениях: увеличение максимальных мощностей, плотности мощности, максимального напряжения; увеличение верхнего диапазона сверхвысоких частот (перспективные разработки направлены на достижение C, X, Ku диапазонов длин волн); уменьшение стоимости до уровня 1 долл. за 1 Вт; повышение надежности, радиационной стойкости (табл. 10.18); уменьшение габаритов изделий [36].

История развития GaN-технологии насчитывает более 30 лет. В 1993 г. появился первый светодиод GaNLED, а в 1997 г. – первый образец GaN-транзистора и образцы усилителей на его основе. Военные и государственные программы позволили активно развивать и внедрять в жизнь технологию GaN. Это известная американская программа WBGSTI, позднее – европейские MARCOS, TIGER, KORRIGAN и японские NEDO и FUPET [5].

В 2001 г. был произведен уже первый серийный GaN-транзистор [37]. Далее все ведущие мировые электронные компании, связанные с производством GaAs-компонентов, стали делать собственные инвестиции в GaN-технологию для изготовления усилителей, MMICs и приборов. В 2006–2007 гг. появились коммерческие серийные GaN-продукты: корпусированные мощные универсальные транзисторы в L- и S-диапазонах (2–4 ГГц) с выходной мощностью от 5 до 50 Вт (позднее – до 120–180 Вт).

Пионерами выхода на коммерческий рынок стали компании Eudyna (Sumitomo) [38], Nitronex [40], Cree [36], RFHIC [5], позже к ним присоединились компании Toshiba, RFMD, M/ACOM Tech., TriQuint [41], OKI [43], Microsemi [44], NXP и др.

Чем больше ширина запрещенной зоны, тем выше допустимая рабочая температура и тем больше сдвинут в коротковолновую область спектра рабочий диапазон приборов, создаваемых на основе соответствующих полупроводниковых материалов. Например, максимальная рабочая температура для приборов на основе GaN достигает 350–400 °С, для приборов на основе алмаза – 500–600 °С и выше. Ширина запрещенной зоны хорошо коррелирует с температурой плавления материала. Обе эти величины возрастают с ростом энергии связи атомов в кристаллической решетке, поэтому для широкозонных полупроводниковых материалов характерны высокие температуры плавления, что рождает определенные трудности на пути создания чистых и структурно совершенных монокристаллов таких полупроводниковых материалов.

Подвижность носителей тока в значительной мере определяет частотные характеристики полупроводниковых приборов. Для создания приборов СВЧ применяются полупроводниковые материалы, обладающие высокими значениями подвижности носителей заряда и способные работать при высоких температурах и высоком уровне радиации, что очень важно для космической промышленности.

Таким образом, чем больше ширина запрещенной зоны, тем устойчивее работа СВЧ-транзистора (табл. 10.18) при высоких температурах и высоком уровне радиации, и чем больше концентрация электронов, тем выше плотность тока в сечении канала транзистора, что обуславливает высокий коэффициент его усиления.

Таблица 10.18. Электронные свойства полупроводниковых материалов Si, GaAs, InP, 3-4-6H-SiC, GaN, C (алмаз)

Свойства материала	Единицы измерения	Si	GaAs (AlGaAs/InGaAs)	InP (InAlAs/InGaAs)	3C-SiC*	4H-SiC*	6H-SiC*	GaN (AlGaN/GaN)	C (алмаз)
Ширина запрещенной зоны, E_g	эВ при 300 К	1,12	1,42	1,34	2,4	3,26	3	3,39	5,47
Подвижность электронов, I_n	300 К, $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	1500	8500	4600	1000	950	500	2000	2800
Подвижность дырок, I_p	300 К, $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	600	400	150	40	120	80	200	2100
Скорость дрейфа электронов при насыщении, $V_{sat} \times 10^7$	см/с	1,0	2,1	2,3	2,5	2,0	2,0	2,7	1,5–2,0
Критическое электрическое поле, E_c	МВ/см	0025	0,4	0,5	2,0	2,2	2,5	5,0	20,0
Коэффициент теплопроводности, К	Вт/см \cdot К при 300 К	1,5	0,55	0,7	3,0–4,0	3,0–4,0	3,0–4,0	1,3	24,0
Диэлектрическая проницаемость, ϵ	–	11,68	12,8	12,5	9,7	10	10	9,5	5,7
C FoM**	–	1	8,5	21	–	250	–	660	75000

Примечания. * 3C, 4H, 6H – предполагаемые кристаллические структуры SiC материалов.

** C FoM (Combined Figure of Merit) – коэффициент качества материала по отношению к кремнию (Si – Silicon) для мощности и частоты.

Чем выше максимальная критическая напряженность электрического поля применяемого полупроводникового материала (табл. 10.18), тем выше максимальное напряжение стока СВЧ-транзистора (50–100 В) и его пробивное напряжение (от 100 до 300 В), что увеличивает надежность и срок эксплуатации изделия. СВЧ-транзисторы, выполненные по GaN-технологии, имеют высокую удельную мощность – до 10 Вт и более на 1 мм ширины затвора, что на порядок превышает удельную выходную мощность СВЧ-транзисторов, выполненных по GaAs-технологии [5, 42]. Все еще проблемными, но постепенно решаемыми задачами GaN-технологии остаются обеспечение теплоотвода от активной структуры кристалла и выращивание эпитаксиальных структур GaN [5].

Ранее для радаров с активной фазированной антенной решеткой (АФАР; АРАР – Active Phased Array Radars или AESA – Active electronically scanned array) твердотельные усилители производились на базе GaAs-технологии. Но на сегодня она обладает более низкой плотностью мощности (0,5–1,5 Вт/мм, табл. 10.19) по сравнению с высокой плотностью мощности GaN HEMTs-технологии (4,0–8,0 Вт/мм ширины затвора СВЧ-транзистора) [42].

Таблица 10.19. Сравнительная характеристика основных параметров GaAs- и GaN-материалов

Свойства материала	Единицы измерения	GaAs	GaN
Плотность выходной мощности, $\rho(P_{out})$	Вт/мм	0,5–1,5	4,0–8,0
Рабочее напряжение, V_{ds}	В/мм	5–20	28–48
Обратное напряжение, V_{br}	В/мм	20–40	> 100
Максимальная плотность тока, $\rho(I_{max})$	А/мм	~0,5	~1,0
Коэффициент теплопроводности, К	Вт/м·К	47	390(z)/490(SiC)

Высокая плотность мощности СВЧ-транзисторов, выполненных по GaN-технологии, позволяет существенно уменьшить габариты и вес твердотельного усилителя радара, что очень важно для авиационных и космических применений, где необходима минимизация веса и габаритов радаров, в том числе и радаров с АФАР [47, 48]. Например, вместо пяти GaAs LDMOS-усилителей можно применить только один GaN-усилитель, обеспечивающий намного лучшие технические характеристики изделия в целом [37].

Коэффициент теплопроводности материала GaN в 8–10 раз выше, чем у GaAs, что позволяет обеспечить лучший и быстрый отвод тепла от чипа ММІС и более высокую плотность мощности (табл. 10.19 и [37]).

Актуальным является решение задачи производства систем связи и радаров на базе новых продуктов GaN для частотных диапазонов С, Х, Ku.

Твердотельные усилители и другие изделия на базе GaN-технологии открывают широкие перспективы для разработки новейших устройств и модернизации уже работающих изделий в важных частотных диапазонах 1–4, 2–6, 4–12, 6–18, 2–20 ГГц, которые могут стать конкурентными ламповым приборам СВЧ (триоды, тератроны, магнетроны, клистроны и т.д.) по выходной мощности, КПД, габаритным размерам, надежности и цене.