

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

# **СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКА В СИСТЕМАХ РАДИОЛОКАЦИИ И СВЯЗИ**

**Техническая энциклопедия  
В 2-х книгах**

**Книга 2**



ТЕХНОСФЕРА



# **М И Р** **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

<b>Глава 10. Базовые технологии полупроводниковой СВЧ-электроники .....</b>	<b>701</b>
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 малошумящих 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
<b>Глава 11. Полупроводниковые СВЧ-приборы для РЛС .....</b>	<b>831</b>
11.1. Элементная база приемопередающих модулей для фазированных антенных решеток .....	831
11.1.1. Аттenuаторы 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. Атенюаторы 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

<b>Глава 12. ВЧ и СВЧ комплектующие компоненты для РЛС</b> .....	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 гермоводов 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
<b>Глава 13. Методы и средства обеспечения надежности радиолокационных систем и систем связи</b> .....	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
<b>Глава 14. Радиофотоника в телекоммуникационных и радиолокационных системах .....</b>	<b>1135</b>
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 радиифотонных 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 р-і-п-фотодетекторов.....	1169
14.8.2. Физические механизмы ограничения фототока р-і-п-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
<b>Глава 15. Измерения и анализ СВЧ-устройств.....</b>	<b>1187</b>
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 четырнадцатиполосным измерительным СВЧ-трактом .....	1245
15.11.2. Структурная схема анализатора цепей с десятиполосным измерительным СВЧ-трактом .....	1248
15.11.3. Структурная схема ВАЦ с восьмиполосным 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
<b>Глава 16. Измерение электрофизических параметров диэлектрических и полупроводниковых материалов и структур СВЧ-электроники.....</b>	<b>1283</b>
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
<b>Глава 17. Радиационная стойкость СВЧ-устройств .....</b>	<b>1371</b>
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