



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ИНСТИТУТ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ
ИМЕНИ В.Г. МОКЕРОВА» РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ИСВЧПЭ РАН)

*Посвящается 70-летию со дня рождения Заслуженного деятеля науки РФ,
д.т.н., профессора Мальцева Петра Павловича*

СИСТЕМЫ НА КРИСТАЛЛЕ СО ВСТРОЕННЫМИ АНТЕННАМИ НА НАНОГЕТЕРОСТРУКТУРАХ А³В⁵

Под общ. ред. д.т.н., профессора П.П. Мальцева

**ТЕХНОСФЕРА
Москва
2018**

УДК 621.382.2/.3

ББК 32.852

C40

**C40 Системы на кристалле со встроенными антеннами
на наногетероструктурах A^3B^5**

/ Под редакцией д.т.н., профессора П.П. Мальцева

Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2018. – 528 с. ISBN 978-5-94836-526-8

В сборник вошли статьи сотрудников Федерального государственного автономного научного учреждения «Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В.Г. Мокерова» Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН), опубликованные в период 2010–2017 гг. по новым направлениям исследований наногетероструктур A^3B^5 (арсенид галлия и нитрид галлия): расчет и моделирование систем на кристалле с интегрированными антеннами и усилителями для крайне высоких частот, создание фотопроводящих антенн для терагерцевых устройств.

Статьи использованы при выполнении работ по заказу Минобрнауки России в рамках: ФЦП «Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники» на 2008–2015 годы, ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России» на 2007–2013 годы и на 2014–2020 годы.

УДК 621.382.2/.3

ББК 32.852

© 2018, ФГАНУ ИСВЧПЭ РАН

© 2018, АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», оригинал-макет, оформление.

ISBN 978-5-94836-526-8

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	11
Глава 1. Малогабаритные встроенные антенны сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн.	15
1.1. Направления развития антенн диапазона 5 ГГц с минимальным объемом.	15
<i>Мальцев П.П., Матвеев О.С., Гнатюк Д.Л., Лисицкий А.П., Фёдоров Ю.В.</i>	
1.1.1. Введение	15
1.1.2. Многослойные антенны.	15
1.1.3. Использование метаматериалов	18
1.1.4. Перестраиваемые антенны	21
1.1.5. Обеспечение круговой поляризации излучения	22
1.1.6. Заключение	24
Литература	24
1.2. Обзор реализаций планарных встроенных антенн диапазона 5 ГГц с минимальным объемом	26
<i>Мальцев П.П., Матвеев О.С., Гнатюк Д.Л., Лисицкий А.П., Фёдоров Ю.В.</i>	
1.2.1. Введение	26
1.2.2. Вибраторные антенны	26
1.2.3. Антенны с щелевыми излучателями	30
1.2.4. Использование фрактальных топологий антенн	30
1.2.5. Заключение	33
Литература	33
1.3. Обзор реализаций встроенных антенн диапазона 5 ГГц с излучателем-моноподем	34
<i>Мальцев П.П., Матвеев О.С., Гнатюк Д.Л., Лисицкий А.П., Фёдоров Ю.В.</i>	
1.3.1. Введение	34
1.3.2. Развитие встроенных антенн на основе монополя	35
1.3.3. Выводы	44
Литература	45
1.4. Интегрированные антенны на наногетероструктурах арсенида галлия	46
<i>Матвеев О.С., Гнатюк Д.Л., Галиев Р.Р.</i>	
Литература	48
1.5. Обзор реализаций планарных антенн X-диапазона с двумя слоями металлизации	49
<i>Мальцев П.П., Матвеев О.С., Гнатюк Д.Л., Лисицкий А.П., Фёдоров Ю.В., Бунегина С.Л., Крапухин Д.В.</i>	
1.5.1. Введение	49
1.5.2. Развитие встроенных антенн на основе монополя	49
1.5.3. Развитие вибраторных антенн X-диапазона	57
1.5.4. Применение фрактальных структур	58
1.5.5. Использование метаматериалов	59
1.5.6. Заключение	60
Литература	60
1.6. Многослойные планарные антенны. Часть 1. Типы, реализации, преимущества.	63
<i>Мальцев П.П., Матвеев О.С., Гнатюк Д.Л., Лисицкий А.П., Фёдоров Ю.В., Крапухин Д.В., Бунегина С.Л.</i>	
1.6.1. Введение	63
1.6.2. Многослойные модификации планарных антенн	64

1.6.3. Апертурно-связанные антенны.	68
1.6.4. Построение антенных решеток (АР) на основе АСА.	69
1.6.5. Расширение рабочей полосы АСА.	70
Литература.	75
1.7. Многослойные планарные антенны. Часть 2. Обеспечение многочастотного режима круговой или эллиптической поляризации излучения.	78
<i>Мальцев П.П., Матвеев О.С., Гнатюк Д.Л., Лисицкий А.П., Фёдоров Ю.В., Крапухин Д.В., Бунегина С.Л.</i>	
1.7.1. Введение.	78
1.7.2. Обеспечение многочастотного режима.	78
1.7.3. Обеспечение круговой или эллиптической поляризации излучения.	82
1.7.4. Заключение.	85
Литература.	85
1.8. Интегрированные антенны для использования в системах на кристалле.	87
<i>Матвеев О.С.</i>	
1.8.1. Введение.	87
1.8.2. Конструкция антенного элемента для частот 5 и 10—12 ГГц.	88
1.8.3. Микрополосковая антенна для V-диапазона частот.	90
1.8.4. Заключение.	92
Литература.	92
Глава 2. Фотопроводящие материалы и интегральные антенны на их основе для терагерцевого диапазона частот.	93
2.1. МНЕМТ с предельной частотой усиления по мощности $f_{\max} = 0,63$ ТГц на основе наногетероструктуры $\text{In}_{0,42}\text{Al}_{0,58}\text{As}/\text{In}_{0,42}\text{Ga}_{0,58}\text{As}/\text{In}_{0,42}\text{Al}_{0,58}\text{As}/\text{GaAs}$	93
<i>Лаврухин Д.В., Ячменев А.Э., Галиев Р.Р., Хабибуллин Р.А., Пономарёв Д.С., Фёдоров Ю.В., Мальцев П.П.</i>	
2.1.1. Введение.	93
2.1.2. Образцы и методика измерений.	94
2.1.3. Результаты измерений и их обсуждение.	96
2.1.4. Заключение.	98
Литература.	98
2.2. Исследование малосигнальных и шумовых характеристик метаморфных транзисторов для монокристаллических интегральных схем в крайневысокочастотном диапазоне.	99
<i>Мальцев П.П., Гнатюк Д.Л., Фёдоров Ю.В., Зуев А.В., Галиев Р.Р., Побойкина Н.В.</i>	
Литература.	103
2.3. Разработка и исследование фотопроводящих антенн на основе полупроводников группы A^3B^5 , выращенных при пониженных температурах эпитаксиального роста.	104
<i>Галиев Г.Б., Климов Е.А., Лаврухин Д.В., Ячменев А.Э., Галиев Р.Р., Пономарёв Д.С., Хабибуллин Р.А., Фёдоров Ю.В., Бугаев А.С.</i>	
2.3.1. Введение.	104
2.3.2. Экспериментальные данные.	104
2.3.3. Выводы.	106
Литература.	107
2.4. Разработка материалов и фотопроводящих антенн на их основе для генерации и детектирования импульсного и непрерывного терагерцевого (ТГц) излучения.	107
<i>Бугаев А.С., Глинский И.А., Пушкарёв С.С., Лаврухин Д.В., Ячменев А.Э., Хабибуллин Р.А., Пономарёв Д.С.</i>	
2.4.1. Введение.	107

2.4.2. Генерация ТГц излучения в LT GaAs и $\text{In}_{0,38}\text{Ga}_{0,62}\text{As}$	108
2.4.3. Разработка фотопроводящих антенн и исследование их электрических и тепловых свойств	110
2.4.4. Заключение	113
Литература	114
2.5. Терагерцевое излучение эпитаксиальных низкотемпературных GaAs структур на подложках GaAs (100) и (111)A.	115
<i>Галиев Г.Б., Буряков А.М., Билык В.Р., Хусяинов Д.И., Мишина Е.Д.,</i>	
<i>Климов Е.А., Клочков А.Н., Пушкарёв С.С., Васильевский И.С., Грехов М.М.,</i>	
<i>Трунькин И.Н., Васильев А.Л.</i>	
2.5.1. Введение	115
2.5.2. Образцы и методика ТГц эксперимента	116
2.5.3. Кристаллическая структура образцов	118
2.5.4. Время жизни фотовозбужденных носителей заряда.	121
2.5.5. Генерация и детектирование ТГц излучения.	122
2.5.6. Заключение	123
Литература	124
Глава 3. Системы на кристалле со встроенными антеннами	126
3.1. Перспективы создания систем на кристалле для СВЧ- и КВЧ-диапазонов частот на арсениде галлия.	126
<i>Мальцев П.П.</i>	
Литература	142
3.2. Перспективы замены арсенидных МИС на нитридные	143
<i>Фёдоров Ю.В., Михайлович С.В.</i>	
3.2.1. Введение	143
3.2.2. Предельные СВЧ-параметры полевых транзисторов с двумерным электронным газом	144
3.2.3. Нитридные НЕМТ	146
3.2.4. Арсенидные НЕМТ на подложках InP	148
3.2.5. Зависимость мощностных параметров нитридных НЕМТ от толщины барьерного слоя наногетероструктур.	149
3.2.6. Заключение	152
Литература	152
3.3. Технология сплавных и несплавных омических контактов к гетероструктурам на основе GaN. Обзор	153
<i>Павлов В.Ю., Павлов А.Ю.</i>	
3.3.1. Сплавные омические контакты.	153
3.3.2. Несплавные омические контакты.	156
3.3.3. Заключение	159
Литература	160
3.4. Влияние параметров наногетероструктур и технологии изготовления на шумовые свойства AlGaIn/GaN НЕМТ.	162
<i>Фёдоров Ю.В., Михайлович С.В.</i>	
3.4.1. Введение	162
3.4.2. Теория.	162
3.4.3. Постановка эксперимента	165
3.4.4. Методика обработки результатов измерений.	165
3.4.5. Результаты и их обсуждение.	166
3.4.6. Заключение	169
Литература	169
3.5. Переход от сплавной к несплавной технологии омических контактов при росте диапазона рабочих частот СВЧ МИС на основе нитрида галлия	170
<i>Павлов А.Ю.</i>	
3.5.1. Введение	170

3.5.2. Методы формирования омических контактов. Сплавные и неславные омические контакты.	170
3.5.3. Требования к омическим контактам при изготовлении полевых транзисторов на гетероструктурах на основе нитрида галлия.	173
3.5.4. Сравнение частотных характеристик полевых транзисторов с омическими контактами, изготовленными разными методами	175
3.5.5. Заключение	176
Литература	177
3.6. Малошумящие усилители диапазона 60 ГГц. Обзор мировых коммерческих разработок	178
<i>Крапухин Д.В.</i>	
3.6.1. Введение	178
3.6.2. Обзор малошумящих усилителей	180
3.6.3. Заключение	185
Литература	186
3.7. Монолитная интегральная схема ГУН V-диапазона	187
<i>Мальцев П.П., Фёдоров Ю.В., Крапухин Д.В., Матвеев О.С., Путинцев Б.Г.</i>	
3.7.1. Введение	187
3.7.2. Разработка и изготовление МИС ГУН V-диапазона	187
3.7.3. Исследования характеристик МИС ГУН.	189
3.7.4. Заключение	190
Литература	191
3.8. Монолитная интегральная схема усилителя со встроенной антенной для пятимиллиметрового диапазона длин волн	191
<i>Мальцев П.П., Матвеев О.С., Фёдоров Ю.В., Гнатюк Д.Л., Крапухин Д.В., Зуев А.В., Бунегина С.Л.</i>	
Литература	195
3.9. Технология изготовления и разработка монолитных интегральных схем на основе нитрида галлия	196
<i>Фёдоров Ю.В., Бугаев А.С., Павлов А.Ю., Гнатюк Д.Л., Матвеев О.С., Павлов В.Ю., Слаповский Д.Н., Томаш К.Н., Енюшкина Е.Н., Галиев Р.Р., Майтама М.В., Зуев А.В., Крапухин Д.В., Гамкрелидзе С.А.</i>	
3.9.1. Введение	196
3.9.2. Формирование приборной мезаизоляции МИС на основе нитрида галлия	197
3.9.3. Формирование омических контактов к гетероструктурам на основе нитрида галлия.	199
3.9.4. Формирование выпрямляющего контакта (затвора Шоттки) к гетероструктурам на основе нитрида галлия	204
3.9.5. Пассивация затвора, формирование конденсаторного диэлектрика	206
3.9.6. Формирование первого уровня металлизации и верхних обкладок конденсаторов	208
3.9.7. Формирование межэлектрических соединений в виде «воздушных мостов»	209
3.9.8. Формирование межэлектрических соединений, обеспечивающих общую землю	209
3.9.9. Реализация технологии изготовления МИС на основе нитрида галлия, разработанных топологических решений для сантиметрового и миллиметрового частотных диапазонов	212
3.9.10. Заключение	215
Литература	215
3.10. Разработка однокристалльных приемопередающих модулей V-диапазона на нитриде галлия.	217
<i>Путинцев Б.Г.</i>	
3.10.1. Введение	217

3.10.2. Разработка и изготовление МИС	218
3.10.3. Характеристики МИС.	220
3.10.4. Заключение	222
Литература	222
3.11. СВЧ-технологии — основа электроники будущего. Тенденции и рынки	224
<i>Мальцев П.П., Шахнович И.В.</i>	
Литература	237
Приложение А. Результаты интеллектуальной деятельности ИСВЧПЭ РАН за 2010–2017 гг.	238
Приложение Б. Усилители мощности и маломощные усилители для диапазона частот 8–12 ГГц. Обзор	242
<i>Фёдоров Ю.В., Майтама М.В., Михалев А.О.</i>	
Б.1. Аналитический обзор современной научно-технической литературы в области усилителей на нитриде галлия.	242
Б.2. Аналитический обзор по разработке перспективных монолитных интегральных схем МИС усилителей мощности и маломощных усилителей диапазона частот 8–12 ГГц	245
Приложение В. Усилители в монолитном исполнении для диапазона частот 57–67 ГГц. Обзор	264
<i>Гнатюк Д.Л., Лисицкий А.П.</i>	
В.1. Патентные исследования в области усилителей в монолитном исполнении мм-диапазона длин волн	264
В.1.1. Защищенные патентами решения построения СВЧ-усилителей в монолитном исполнении мм-диапазона длин волн	264
В.1.2. Развитие многокаскадного усилителя	265
В.1.3. Развитие распределенного усилителя.	273
В.1.4. Схемотехника каскадов с непосредственными связями (каскада).	276
В.2. Схемотехнические, конструкторские решения интегральных схем маломощных усилителей мм-диапазона длин волн	281
В.2.1. Развитие многокаскадной схемы маломощных усилителей мм-диапазона длин волн	281
В.2.2. Применение структуры распределенного усилителя для построения маломощного усилителя	288
В.2.3. Применение каскадной схемы.	289
В.3. Реализация усилителей.	291
В.4. Заключение	297
Литература	297
Приложение Г. Генераторы, управляемые напряжением для диапазона частот 57–67 ГГц. Обзор	300
<i>Гнатюк Д.Л., Лисицкий А.П.</i>	
Г.1. Основная (аналитическая) часть. Генераторы, управляемые напряжением мм-диапазона длин волн.	300
Г.2. Развитие схемы генератора с одиночным транзистором	301
Г.3. Развитие генераторов, управляемых напряжением, построенных на двухтактных дифференциальных схемах	307
Г.4. Примеры разработки генераторов, управляемых напряжением	310
Г.5. Заключение	311
Литература	312

Приложение Д. Схемотехнические и конструкторские решения для смесителей для диапазона частот 57–67 ГГц. Обзор	313
<i>Гнатюк Д.Л., Лисицкий А.П.</i>	
Д.1. Принципы построения смесителей	313
Д.2. Схемотехника перемножителей	318
Д.3. Структуры двойных балансных смесителей на основе перемножителей	332
Д.4. Реализация фазорасщепителей	341
Д.5. Реализация смесителей	358
Д.6. Заключение	363
Литература	363
Приложение Е. Радиоприемные устройства для диапазона частот 57–67 ГГц. Обзор	367
<i>Гнатюк Д.Л., Лисицкий А.П.</i>	
Е.1. Развитие радиоприемных устройств мм-диапазона длин волн	367
Е.1.1. Охраняемые схемотехнические решения радиоприемных устройств мм-диапазона длин волн	367
Е.1.2. Схемотехнические и конструктивные решения радиоприемных устройств мм-диапазона длин волн	369
Е.1.3. Системы на кристалле мм-диапазона длин волн	376
Е.1.4. Реализация гибридной сборки системы в корпусе на основе многослойных плат	399
Е.1.5. Гибридная сборка МИС приемопередающего модуля и антенн мм-диапазона длин волн	406
Е.1.6. Заключение	423
Литература	423
Приложение Ж. Стратегическая программа исследований технологической платформы «СВЧ-технологии»	429
Ж.1. Текущие тенденции развития рынков и технологий в сфере деятельности платформы	432
Ж.1.1. Описание текущего состояния рынков отраслей и секторов экономики по основным показателям (объемы рынков и их основных сегментов, динамика их роста и др.)	432
Ж.1.2. Описание основных технических и технологических решений, в целом характеризующих текущий уровень развития рынков и технологий	436
Ж.1.3. Анализ конкуренции на внутреннем и внешних рынках и их ключевых сегментов	444
Ж.1.4. Оценка технических и технологических решений и компетенций, обеспечивающих конкурентоспособность российских предприятий — производителей продукции ТП	448
Ж.1.5. Оценка обеспеченности кадрами	453
Ж.1.6. Оценка доступности РИД по технологиям, которые предполагается развивать в рамках ТП	457
Ж.1.7. Возможности и ограничения использования объектов научной и инновационной инфраструктуры	458
Ж.2. Прогноз развития рынков и технологий в сфере деятельности платформы	459
Ж.2.1. Видение будущего в контексте социально-экономического развития России на средне- и долгосрочную перспективу	459
Ж.2.2. Сценарии развития рынков и технологий в отраслях и секторах экономики, к которым относится ТП, в том числе спроса на основные виды продукции ТП	460

Ж.2.3. Прогноз потребности в кадрах	466
Ж.2.4. Прогноз развития технологий, относящихся к ТП (наиболее конкурентоспособности), прогноз основных свойств (технических и потребительских характеристик)	470
Ж.2.5. Идентификация рынков, характеризующихся существенными возможностями распространения основных параметров развития данных рынков	471
Ж.2.6. Виды продукции ТП, имеющие наилучшие рыночные перспективы в кратко-, средне- и долгосрочном периоде.	476
Ж.2.7. SWOT-анализ альтернативных продуктов и услуг. Выявление барьеров, рисков и ограничений развития продукции ТП	477
Ж.3. Направления исследований и разработок, наиболее перспективные для развития в рамках платформы.	479
Ж.3.1. Направления исследований и разработок, по которым участники ТП заинтересованы координировать свои действия и/или осуществлять кооперацию друг с другом на доконкурентной стадии	479
Ж.3.2. Перечень продукции ТП. Группы технологий, которые предполагается развивать в рамках технологической ТП. Цели и задачи технологической ТП, уточненные/актуализированные исходя из состава и структуры направлений кооперации R&D на доконкурентной стадии	481
Ж.3.3. Направления собственных (российских) научных исследований и разработок для обеспечения российских предприятий-производителей техническими и технологическими решениями, важнейшими с точки зрения их конкурентоспособности (в средне- и долгосрочном периоде)	483
Ж.4. Тематический план работ и проектов платформы в сфере исследований и разработок	485
Ж.4.1. Детализированный план работ и проектов в сфере исследований и разработок, которые предполагается выполнить на первом этапе деятельности ТП (в первоочередном порядке)	485
Ж.4.2. Работы и проекты, которые предполагается выполнять совместно несколькими участниками ТП (при координации действий и/или в кооперации участников друг с другом на доконкурентной стадии)	486
Ж.5. Мероприятия по коммерциализации технологий и совершенствованию механизмов управления правами на результаты интеллектуальной деятельности	486
Ж.5.1. Выявление возможностей и ограничений использования ранее созданных РИД для достижения целей и задач ТП	489
Ж.5.2. Система мер по организационному, финансовому, экспертному и информационному обеспечению патентования РИД, полученных в ходе реализации ТП	490
Ж.5.3. Мероприятия по совместному использованию результатов интеллектуальной деятельности участниками ТП.	492
Ж.5.4. Мероприятия по содействию коммерциализации результатов интеллектуальной деятельности.	493
Ж.6. Меры в области подготовки и развития научных и инженерно-технических кадров.	495
Ж.6.1. Развитие образовательных и профессиональных стандартов в сфере деятельности ТП.	495
Ж.6.2. Совершенствование действующих и разработка новых программ профессионального и дополнительного образования с учетом потребностей бизнеса в сфере деятельности ТП. Обеспечение их реализации на базе ведущих вузов в необходимых объемах	500

Ж.6.3. Совершенствование профильной и уровневой структуры подготовки специалистов с учетом потребностей бизнеса в сфере деятельности ТП, развитие механизмов непрерывного образования	504
Ж.6.4. Содействие мобильности научных и инженерно-технических кадров и обмену кадрами между организациями — участниками технологической ТП (стажировки, обмен и другие формы)	508
Ж.6.5. Формирование механизмов мониторинга кадрового обеспечения предприятий — участников технологической ТП, а также уровня подготовки их научных и инженерно-технических кадров . . .	509
Приложение 3. Справочный лист комплекта монолитных интегральных схем на нитриде галлия для диапазона 57–64 ГГц	520
Перечень сокращений, условных обозначений, символов, единиц, терминов	526
Перечень кодов стран и соответствующие им наименования стран, других административных единиц и межправительственных организаций ВОИС, ST. 3:	527

*Посвящается 70-летию со дня рождения
Мальцева Петра Павловича*

ВВЕДЕНИЕ

В данный сборник вошли статьи сотрудников Федерального государственного автономного научного учреждения «Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В.Г. Мокерова Российской академии наук» (ИСВЧПЭ РАН), опубликованные в период с 2010 по 2017 гг., которые освещают новые направления исследований наногетероструктур A^3B^5 (арсенид галлия и нитрид галлия):

- расчет и моделирование систем на кристалле с интегрированными антеннами и усилителями для крайне высоких частот;
- создание фотопроводящих антенн для терагерцевых устройств.

Статьи использованы при выполнении работ по заказу Минобрнауки России в рамках: ФЦП «Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники» на 2008–2015 годы, ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России» на 2007–2013 годы и на 2014–2020 годы.

Кратко можно отметить следующие основные моменты биографии Мальцева П.П.: родился 28 сентября 1947 г., закончил физико-математическую среднюю школу № 110 в г. Ташкенте в 1967 г., получил высшее техническое образование в Ташкентском электротехническом институте связи (1967–1971 гг.) и закончил аспирантуру Московского электротехнического института связи (1973–1977 гг.). Работал в 22-м Центральном научно-исследовательском институте Министерства обороны (1977–1989 гг.), Секции прикладных проблем при Президиуме Российской академии наук (1989–2007 гг.), Технологическом центре МИЭТ (2007–2009 гг.), а с 2010 г. — директор и с 2016 г. по н.в. — научный руководитель ИСВЧПЭ РАН.

В 1985–1986 гг. Мальцев П.П. с коллективом Научно-исследовательского института молекулярной электроники (НИИМЭ) сформировал комплексно-целевую программу по разработке цифровых интегральных схем на арсениде галлия двойного назначения. Создание интегральных схем на арсениде галлия и их испытания стали основой докторской диссертации П.П. Мальцева (1994 г.) и присвоения звания профессора (1996 г.), а затем по данной тематике ему в составе коллектива ученых была присуждена премия Правительства Российской Федерации в области науки и техники за 1999 г. (в 2000 г.).

Мальцев П.П. является известным специалистом в области электроники, он активно участвовал в разработке комплексно-целевых программ по созданию приборов нанoeлектроники (1995 г.) и по разработке микросистемной техники (1998 г.) двойного назначения.

Мальцев П.П. разработал в 2010 году технологическую платформу ТП 104 «Мобильные и беспроводные коммуникации в миллиметровом диапазоне длин волн (60—90 ГГц)» (организатор ИСВЧПЭ РАН), которая вошла в технологическую платформу «СВЧ-технологии», включенную в Перечень технологических платформ (утвержден решениями Правительственной комиссии по высоким технологиям и инновациям (от 01.04.2011 г. протокол №2 и от 05.07.2011 г. протокол №3) и решением президиума Правительственной комиссии по высоким технологиям и инновациям (от 21.02.2012 г. протокол №2) — позиция в перечне №26).

Научная жизнь Мальцева П.П. тесно переплелась с работой в качестве главного редактора журналов «Нано- и микросистемная техника» (с 1999 г. по н. в.), «Электроника: Наука. Технология. Бизнес» (2005—2011 гг.) и «Наноиндустрия» (2007—2011 гг.). Он активно внедрял научные результаты в образовательный процесс и в 1999 г. создал кафедру микросистемной техники в Московском институте радиотехники, электроники и автоматики (МИРЭА), которую возглавлял до 2016 г. — до создания объединенной кафедры наноэлектроники. За время работы кафедры было подготовлено более трехсот специалистов по микросистемной технике, бакалавров и магистров по специальности «нанотехнологии и микросистемная техника», а также около десятка кандидатов технических наук.

Мальцев П.П. внес большой вклад в подготовку специалистов высшей квалификации, работая в составе экспертного совета Высшей аттестационной комиссии России (с 1998 г. по н. в.). Он является соавтором более 250 публикаций, а также около 40 результатов интеллектуальной деятельности.

В 2014 г. П.П. Мальцев награжден знаком «Заслуженный деятель науки Российской Федерации», а в 2015 г. ему присуждена премия им. А.А. Расплетина Российской академии наук за цикл публикаций по созданию СВЧ-систем на кристалле на широкозонных полупроводниках для миллиметрового диапазона длин волн.

Ранее вышел сборник статей, посвященный 70-летию члена-корреспондента РАН В.Г. Мокерова (1940—2008 гг.), в который вошли статьи сотрудников ИСВЧПЭ РАН, опубликованные в период с 1986 по 2009 годы (монография «Наногетероструктуры в сверхвысокочастотной полупроводниковой электронике». М.: Техносфера. 2010. 432 с. Составитель: П.П. Мальцев).

Данный сборник статей посвящается 70-летию со дня рождения Заслуженного деятеля науки РФ, д.т.н., профессора Мальцева Петра Павловича — директора ИСВЧПЭ РАН с 2010 по 2016 годы.

*Директор ИСВЧПЭ РАН,
д.т.н., профессор С.А. Гамрелидзе*



Фотография от 22 мая 2018 г.: установление на здании ИСВЧПЭ РАН памятной доски с барельефом члена-корреспондента Российской академии наук Мокерова Владимира Григорьевича — директора-организатора института с 2002 по 2008 годы. Слева — Мальцев Петр Павлович, д.т.н., профессор, научный руководитель ИСВЧПЭ РАН; справа — Гамкредидзе Сергей Анатольевич, д.т.н., профессор, директор ИСВЧПЭ РАН. Приказом ФАНО России от 24.01.2018 г. № 23 Федеральному государственному автономному научному учреждению институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук присвоено имя В.Г. Мокерова.

**Монографии, справочники и сборники статей
под редакцией или в соавторстве с П.П. Мальцевым**

1. Цифровая обработка информации на основе быстродействия БИС / С.А. Гамкредидзе, А.В. Завьялов, П.П. Мальцев, В.Г. Соколов / Под редакцией В.Г. Домрачева. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 136 с.: илл.
2. Интегральные микросхемы: взаимозаменяемость и аналоги: Справочник / М.А. Бедревский, А.А. Косырбасов, П.П. Мальцев. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 272 с.: илл.
3. Базовые матричные кристаллы и матричные БИС / В.Г. Домрачев, П.П. Мальцев, В.Г. Новаченко, С.Н. Пономарев. — М.: Энергоатомиздат, 1992. — 224 с.: илл.

4. Цифровые интегральные микросхемы: Справочник / П.П. Мальцев., Н.С. Долидзе, М.И. Критенко, С.Н. Понамарев, В.В. Портянко, Т.Т. Посысаева, Л.З. Михалева. — М.: Радио и связь, 1994. — 128 с.: илл.
5. Датчики теплотехнических и механических величин: Справочник / П.П. Мальцев, А.Ю. Кузин, И.А. Шапортов, И.А. Беспалов. — М.: Энергоатомиздат, 1996. — 128 с.: илл.
6. Программируемые логические ИМС на КМОП-структурах и их применение / П.П. Мальцев, Н.И. Гарбузов, А.П. Шарاپов, Д.А. Кнышев. — М.: Энергоатомиздат, 1998. — 160 с.: илл.
7. Нано- и микросистемная техника. От исследований к разработкам / Под редакцией П.П. Мальцева. — М: Техносфера, 2005. — 592 с.
8. Наноматериалы. Нанотехнологии. Наносистемная техника. Мировые достижения за 2005 г. / Под редакцией П.П. Мальцева. — М: Техносфера, 2006. — 152 с.
9. Нанотехнологии. Наноматериалы. Наносистемная техника. Мировые достижения за 2008 г. / Под редакцией П.П. Мальцева. — М: Техносфера, 2008. — 432 с.
10. Базовые лекции по электронике. Т. II. Твердотельная электроника, глава 13 «Микросистемная техника» / П.П. Мальцев, В.А. Телец. — М.: Техносфера, 2009. — 76 с.: илл.
11. Успехи наноинженерии: электроника, материалы, структуры / Под ред. Дж. Дэвиса, М. Томпсона; пер. с англ. А.Е. Грахова под ред. П.П. Мальцева. — М: Техносфера, 2011. — 496 с. — (16 с. цв. вклейки).
12. Управление техническим уровнем высокоинтегрированных электронных систем (научно-технологические проблемы и аспекты развития) / А.С. Комаров, Д.В. Крапухин, Е.И. Шульгин. Под редакцией П.П. Мальцева. — М: Техносфера, 2014. — 240 с.

ГЛАВА I

МАЛОГАБАРИТНЫЕ ВСТРОЕННЫЕ АНТЕННЫ САНТИМЕТРОВОГО И МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНОВ ДЛИН ВОЛН

1.1. Направления развития антенн диапазона 5 ГГц с минимальным объемом¹

*Мальцев П.П., Матвеев О.С., Гнатюк Д.Л.,
Лисицкий А.П., Фёдоров Ю.В.*

1.1.1. Введение

В работах [1, 2] рассмотрены вопросы разработки встроенных антенн диапазона 5 ГГц с излучателем-монополем, а также различных планарных излучателей на основе двухслойной металлизации. Ниже рассматриваются многослойные и объемные антенны, применение метаматериалов, средств коммутации и методы обеспечения круговой поляризации для антенн диапазона 5 ГГц.

1.1.2. Многослойные антенны

Как рассмотрено в работе [1, 2], излучающий резонатор для экономии площади выполняется деформированным и изогнутым. Излучатель также может быть выполнен в различных слоях (рис. 1) [3]. Далее на рисунках черным кружком или стрелкой указывают место подачи сигнала. При размерах $28 \times 9 \times 3$ мм и $\epsilon = 4,34$, толщине диэлектрика $h = 1,5$ мм обеспечены рабочие полосы (5,15–5,35 и 5,725–5,825 GHz) при КСВ < 2.

В работе [4] описан пассивный вибратор объемной (трехслойной) реализа-

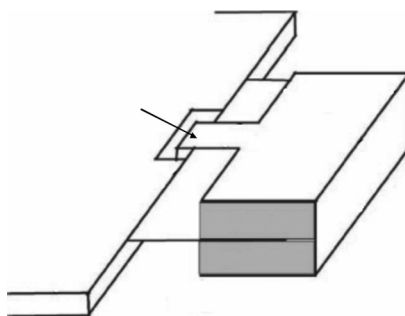


Рис. 1. Изогнутый излучатель, выполненный в различных слоях

¹Нано- и микросистемная техника. 2011. № 11. С. 45–53.

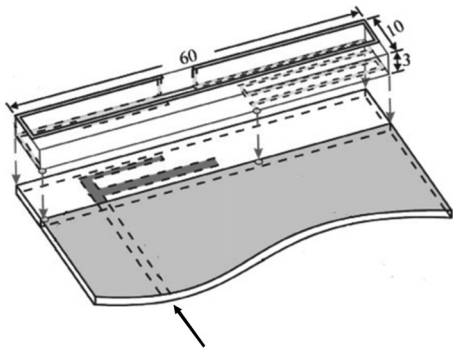


Рис. 2. Пассивный вибратор объемной (трехслойной) реализации. Стрелка показывает точку подачи сигнала

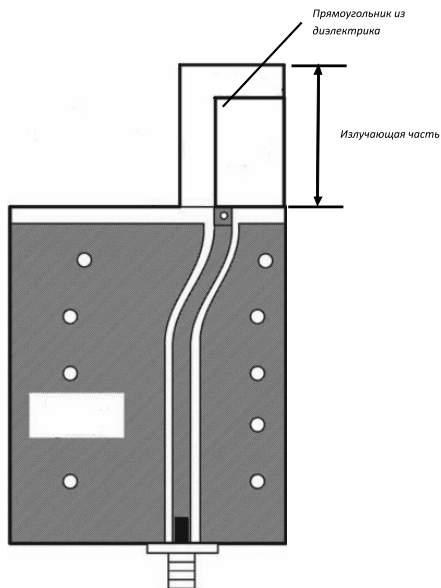


Рис. 3. Антенна, основанная на прямоугольнике из диэлектрика с двухслойным излучателем под ней

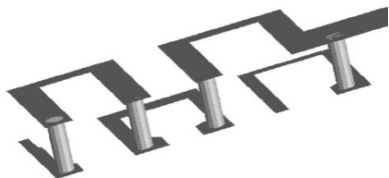


Рис. 4. Вид двухслойного излучателя-спирали

ции (рис. 2). Подводящая линия выполнена в нижнем проводящем слое. При размерах вибратора $60 \times 10 \times 3$ мм обеспечена полоса 1,83 — 2,78 ГГц.

Двухслойный излучатель (рис. 3) с объемной спиралью (рис. 4), расположенный под прямоугольником из диэлектрика (ПД) ($\epsilon = 7,7$), обеспечивает полосы 2,35—2,57, 5,29—6,01 ГГц при размерах ПД 8×4 мм и общих размерах излучающей части $12,2 \times 7$ мм, реализованной на диэлектрике $\epsilon = 4,4$ [5].

Трехслойная антенна со сложной топологией «промежуточного» земляного проводника, поднятого над непрерывным земляным проводником (рис. 5), обеспечивает узкие полосы 2,45; 3,5; 5,2; 5,75 ГГц с коэффициентом усиления ДН более 9 дБ при малых размерах $12 \times 13,8 \times 4$ мм [6].

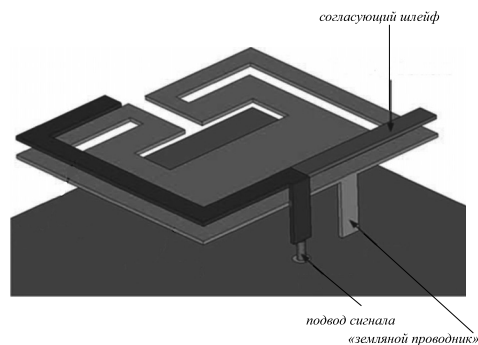
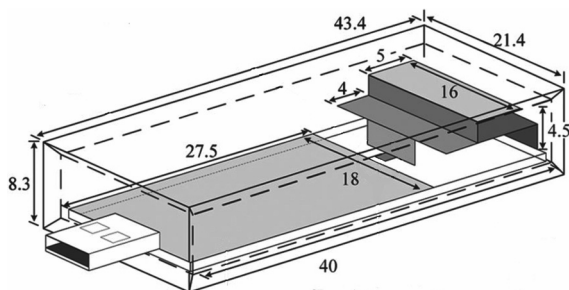


Рис. 5. Трехслойная антенна с «промежуточным» земляным проводником

Разработан излучатель-монополюль (рис. 6), выполненный в различных планарных слоях в размерах блока памяти USB flash с полосой 2,3—11 ГГц (размер монополя $16 \times 9 \times 4,5$) [7].

Конструкцию многослойной антенны с монополюлем, имеющим ще-

Рис. 6. Монополь, выполненный в различных планарных слоях в размерах блока памяти USB flash



левой резонатор (рис. 7), защищает патент [8]. Обеспечивается кардиоидная форма ДН в полосе 1—2,4 ГГц.

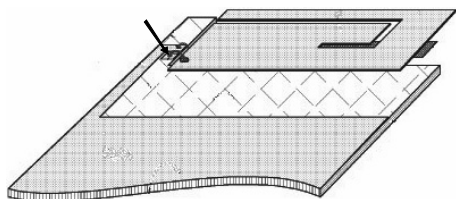
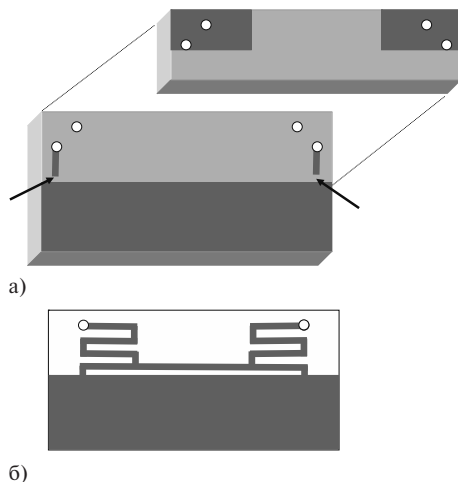


Рис. 7. Многослойная антенна с монополем, имеющим щелевой резонатор

Предложена антенна из двух слоев диэлектрика с подводом сигнала в два удаленных монополя [9]. Верхний слой имеет два идентичных излучателя-монополя размером $16 \times 6,5$ мм, соединенных через металлизированные отверстия с меандрами земляной металлизации (рис. 8). Обеспечена полоса 1,8—2,55 ГГц при размерах излучателя $50 \times 10 \times 3$ мм. Для диапазона 5 ГГц размеры уменьшаются в два раза, что обеспечивает данной антенне размеры, минимальные среди широкополосных антенн.

В работе [10] описан объемный вибратор (рис. 9). Получены полосы частот 2,400—2,690; 3,400—3,800; 5,150—5,850 ГГц при размерах $20 \times 20 \times 14$ мм.



а)

б)

Рис. 8. Строение антенны с подводом сигнала в две удаленные точки, *а* — металлизация верхнего и нижнего слоев диэлектрика, *б* — нижний (земляной) слой. Стрелки показывают место подачи синфазных сигналов

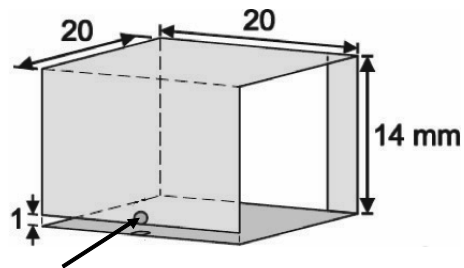


Рис. 9. Объемный вибратор

Компактная антенна предложена на основе меандров в трех проводящих слоях (рис. 10) [11]. На верхнюю пару меандров сигнал поступает с выхода фазорасщепителя (balun) в виде чипа SMD. Таким образом, верхняя пара меандров являются активными вибраторами, нижние меандры — пассивными. Обеспечена узкая полоса в районе 5 ГГц при размерах $22,0 \times 17,0$ мм. Излучатели-меандры имеют малые размеры $3,95 \times 5,1$ мм и выполнены на диэлектрике с $\epsilon = 3,5$; $h = 0,3$ мм для каждого слоя.

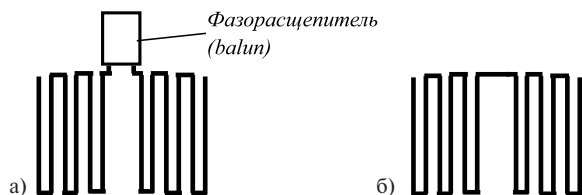


Рис. 10. Антенна на основе меандров в трех слоях: а — топология верхнего слоя; б — двух нижних слоев

1.1.3. Использование метаматериалов

Метаматериалы, представляющие многослойные комбинации проводников и диэлектриков со структурой много меньшей длины волны, могут быть подобны средам с большой электрической или магнитной проницаемостью, что позволяет уменьшить размеры антенн. В работе [12] изложены основы электродинамического анализа метаматериалов и предложен монополюс, выполненный из ячеек метаматериала с земляным проводником (рис. 11). При размерах антенны 32×28 мм, $\epsilon = 2,2$; $h = 0,76$ мм получена полоса 5—9 ГГц, коэффициент усиления ДН 2—6 дБ.

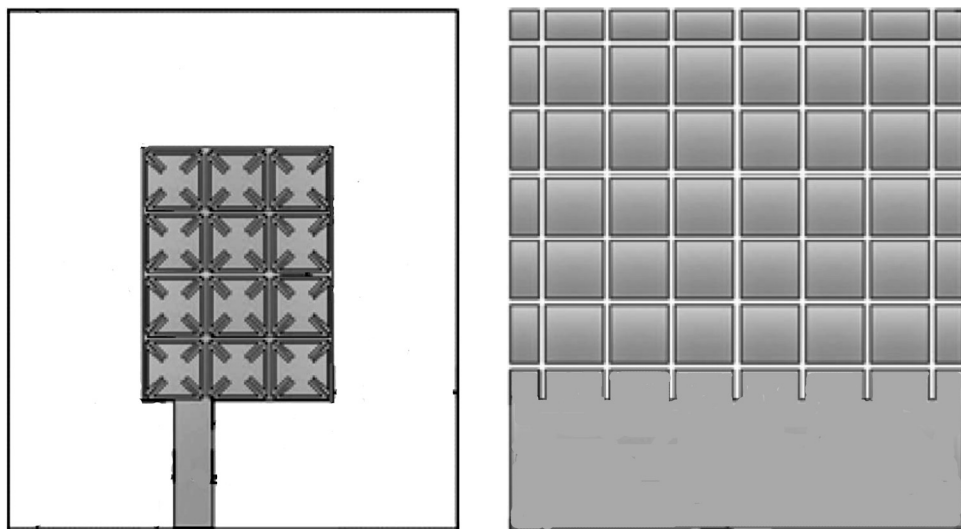


Рис. 11. Топология монополя и земляного проводников, выполненных из метаматериала

Антенна из трех пластин металлизированного диэлектрика с монопольным излучателем (рис. 12, а) над экраном вида прямоугольника (рис. 12, б) с окном (первая пластина), размещенным над двумя идентичными частотно селективными проводящими слоями (frequency selective surface (FSS)) второй и третьей пластин (рис. 12, в) при $\epsilon = 4,4$. Получена однонаправленная ДН с коэффициентом усиления более 6 дБ в рабочей полосе 3–12 ГГц [13].

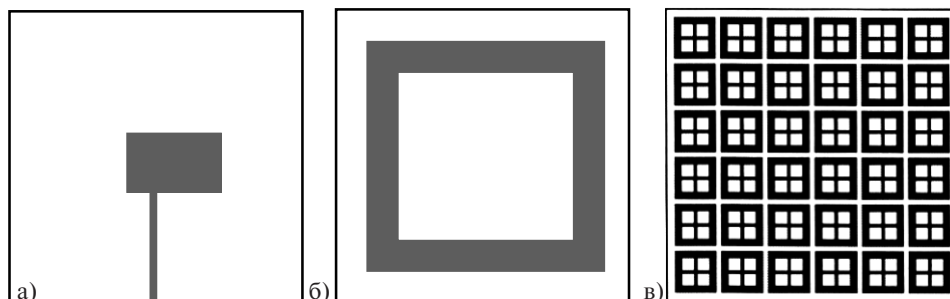


Рис. 12. Топологии слоев монопольного излучателя, несимметричного относительно подводящей линии (а), земляного проводника (б) и двух частотно селективных проводящих слоев (в)

Четыре слоя диэлектрика с металлизацией с идентичными S-образными щелями в металлизации каждого слоя (рис.13), расположенные над монополем, повышают коэффициент усиления ДН антенны с 6 до 8 дБ в рабочей полосе 5,56–5,91 ГГц [14]. Размер антенны — 55 × 30 мм, $\epsilon = 4,4$. Сечение антенны показано на рис. 14. Излучение направленно вверх, то есть через проводники метаматериала.

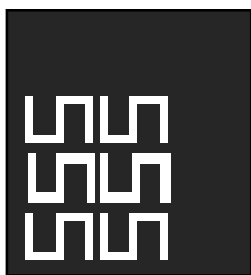


Рис. 13. Вид S-образных щелей в металлизации диэлектрика

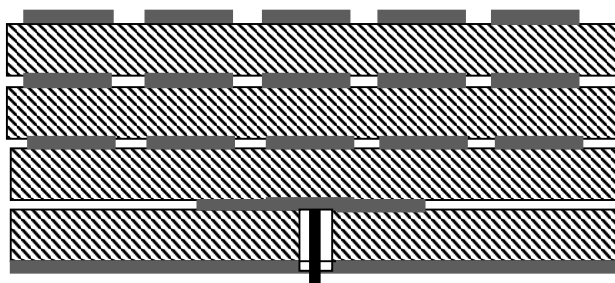


Рис. 14. Поперечное сечение антенны с монополем, с четырьмя слоями диэлектрика, имеющими металлизацию в виде решетки из S-образных щелей

Из метаматериала сделан излучатель-монополь и площадка на обратной стороне, соединенная с земляным проводником подводящей копланарной линии через металлизированное отверстие (рис. 15) [15]. Получена полоса

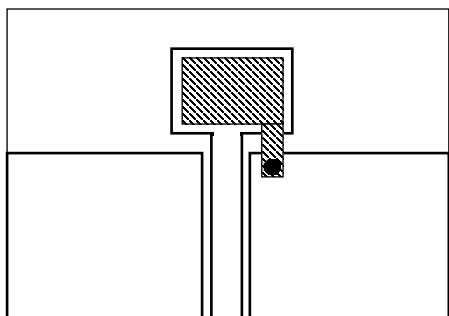


Рис. 15. Вид антенны с монополем и согласующей площадкой в земляном слое из метаматериала. Земляной слой показан штриховой линией

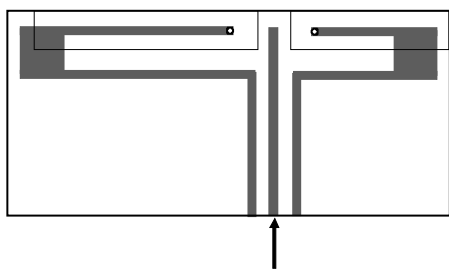


Рис. 16. Топология с монополем в виде узкой линии и шлейфов земляных проводников, контур обозначает проводники земляного слоя

3,14–7,20 ГГц при размере монополя 6×5 мм, общем размере 30×22 мм, при $\varepsilon = 4,34$; $h = 1,59$.

Из метаматериала выполнен монополь в виде узкой линии и узкие земляные проводники (рис. 16) [16]. Получена полоса 2,2–2,5 ГГц при размерах излучателя 40×15 мм, $h = 1$ мм; $\varepsilon = 4,6$.

На основе меандров, образующих с прямоугольным проводником емкостно-связанные резонаторы (zeroth-order resonator (ZOR)) разработана антенна для частот 2,04, 2,41, 3,52 ГГц (рис. 17) [17]. Сигнал подается через вертикальный коаксиал на левую площадку, с которой благодаря емкостной связи поступает на идентичные резонаторы, имеющие заземление в центре. Диэлектрик отделен от земляного проводника зазором толщиной 6,2 мм. Размер излучателя примерно 15×9 мм, размер антенны 20×20 мм, $\varepsilon = 4,4$; $h = 1,52$.

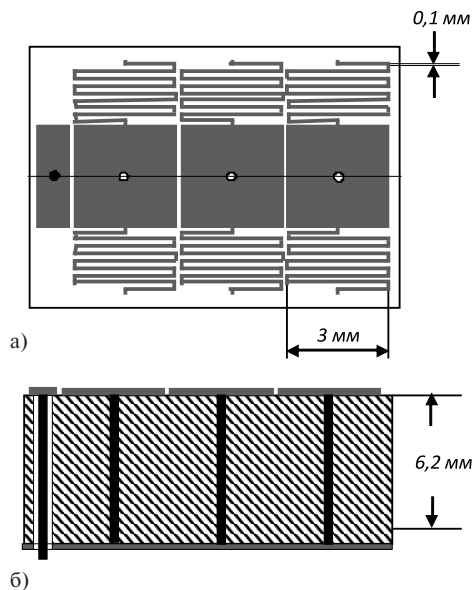


Рис. 17. Топология излучателя с емкостно-связанными резонаторами (а) и разрез антенны по коаксиалу (б)

1.1.4. Перестраиваемые антенны

Не представляет трудностей введение в планарную антенну управляющих элементов (варакторных и PIN-диодов), что позволяет управлять рабочей полосой частот антенны. Антенна выполняется узкополосной, что приводит к уменьшению размеров. Предложена перестраиваемая варакторными и PIN-диодами антенна типа Яги (рис. 18) [18]. Диапазон перестройки 10% при рабочей частоте 6 ГГц.

В работе [19] описана антенна PIFA с двумя управляющими варакторами (рис. 19). При максимальном изменении емкости варактора происходит изменение рабочих полос: 0,7–0,95 ГГц (GSM900), 1,79–2,19 ГГц (UMTS), 3,43–3,64 ГГц (WiMAX), 5–5,06 ГГц (HiperLAN/2). Антенна имеет размеры $50 \times 43,5$ мм, излучатель $31,5 \times 30$ мм.

В работе [20] описан объемный излучатель размером $13 \times 20 \times 4$ мм (рис. 20) с перестройкой единственным варактором, обеспечивающий полосы 1,6–2,4 и 3,2–4,5 ГГц.

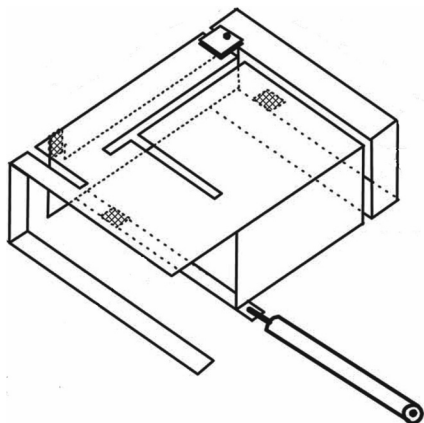


Рис. 20. Объемный излучатель с перестройкой варактором

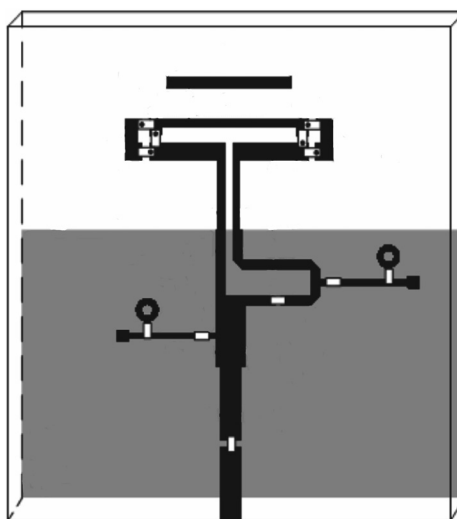


Рис. 18. Антенна типа Яги, перестраиваемая варакторными и PIN-диодами

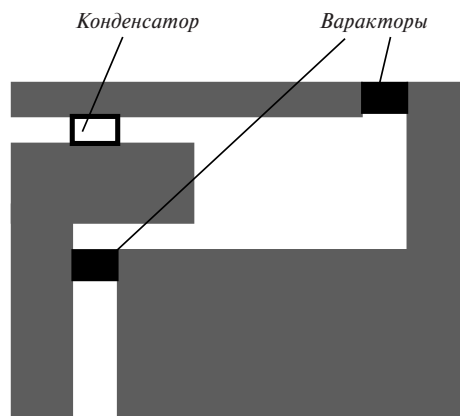


Рис. 19. Излучатель антенны PIFA с управляющими варакторами

В работе [21] описан меандровый излучатель в виде ортогональной сетки проводников с MEMS коммутаторами, что позволяет в широких пределах изменять площадь монополя, присоединенную к источнику сигнала. При управлении MEMS пе-

реключателями достигнут сдвиг частоты минимума КСВ с 4,57 до 6,84 ГГц. Данные результаты следует считать предварительными, так как сетка из MEMS-переключателей, введенная в металлизацию, открывает новые возможности для управления рабочей топологией как антенн, так и СВЧ-устройств в целом.

Возможно также управление направлением главного луча диаграммы направленности антенны [22] путем введения варакторов в излучающие щелевые резонаторы.

1.1.5. Обеспечение круговой поляризации излучения

Для мобильных устройств необходимо обеспечивать круговую поляризацию излучения. Возможно очевидное решение — использовать пару ортогональных автономных излучателей, либо реализовать топологию излучателя с токами в излучателе, ортогональными по направлению. Возможно компромиссное решение, при котором сигнал подается на пару ортогональных излучателей, имеющих общий земляной проводник.

Реализация второго подхода описана в работе [23]. Форма излучателя показана на рис. 21. Расчеты показали полосу 5,12–5,9 ГГц при КСВ < 2, размерах излучателя 21×21 мм, $\varepsilon = 1$; $h = 2,5$.

Близкая по структуре антенна на основе монополя с щелевым резонатором и с третьим проводящим слоем между монополем и земляным проводником описана в работе [24] (рис. 22). Получена узкая полоса 1,0% для 3,5 ГГц и 3,1% для 5,8 ГГц.

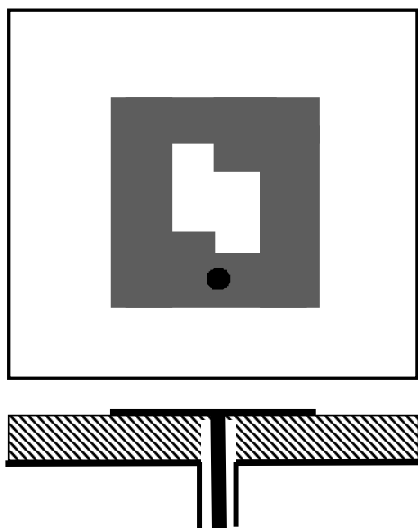


Рис. 21. Излучатель антенны с круговой поляризацией: разрез по оси коаксиала и вид сверху

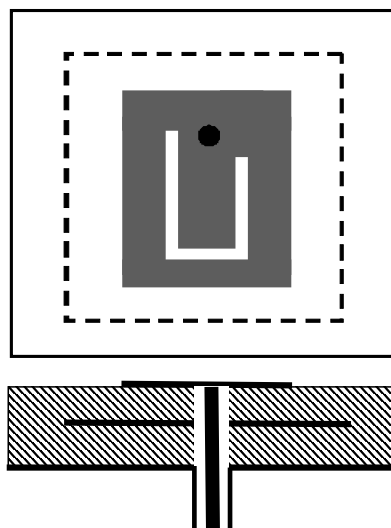


Рис. 22. Вид сверху и разрез антенны круговой поляризации с щелевым резонатором

Крестообразный излучатель, представляющий второй вариант антенны с круговой поляризацией (рис. 23), описан в работе [25]. Размер излучателя 23×23 мм, обеспечена полоса WiMAX 3,5 ГГц.

Излучатель, показанный на рис. 24, обеспечивает круговую поляризацию при подводе сигнала близко к центру в полосе более 2—4 ГГц [26]. Размеры 30×30 мм, $\varepsilon = 3,5$; $h = 1,52$.

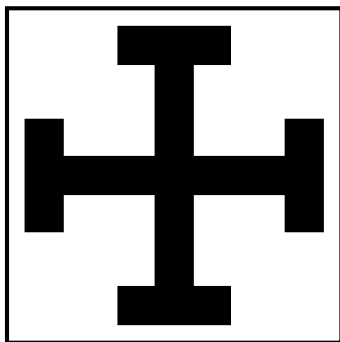


Рис. 23. Крестообразный излучатель



Рис. 24. Излучатель круговой поляризации

Круговую поляризацию обеспечивает антенна (рис. 25), топология которой совместно с согласующими цепями приведена в работе [27]. Получено узкополосное согласование на частоте 5,83 ГГц, $\varepsilon = 3,0$; $h = 0,5$.

В патенте [28] защищены разновидности топологий обоих проводников планарной антенны следующего вида: в земляном проводнике создается S-образная щель, к которой сигнал подводится по микрополосковой линии на противоположной стороне (рис. 26). Такая структура обеспечивает круговую поляризацию и форму ДН, близкую к кардиоидной.

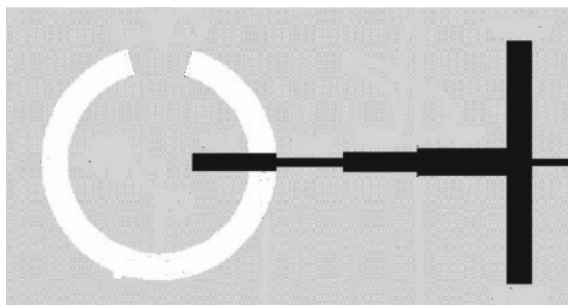


Рис. 25. Топология антенны круговой поляризации с согласующими цепями

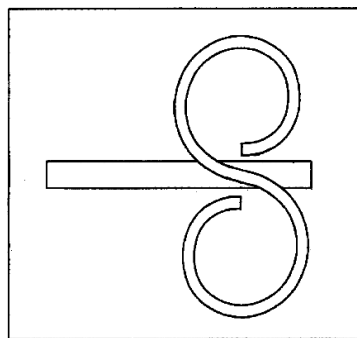


Рис. 26. Топологии сигнального полоска и S-образной щели антенны круговой поляризации

Третий подход реализован в работе [29]. Антенна состоит из двух металлизированных слоев диэлектрика и проводящей плоскости под ними, разделенных воздушными зазорами. Два излучателя, расположенных взаимно перпендикулярно, выполнены на нижней стороне нижнего диэлектрика, верхняя металлизация которого непрерывна, за исключением квадратной щели. (рис. 27). На верхнем диэлектрике металлизация присутствует в виде прямоугольника на нижней стороне. Получена полоса 2,95–4,3 ГГц при размерах излучателя 22×22 мм.

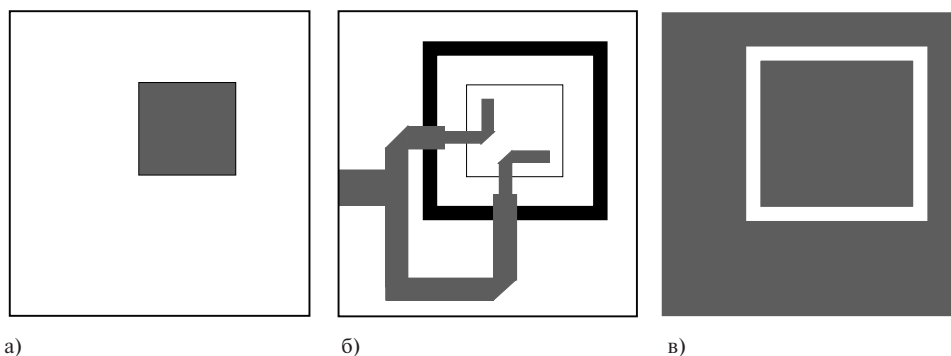


Рис. 27. Антенна круговой поляризации с ортогонально расположенными излучателями над общим земляным проводником: *а* — нижняя сторона верхнего диэлектрика, *б* и *в* — нижняя и верхняя стороны нижнего диэлектрика. Для наглядности на слое (*б*) показаны силуэты других слоев

1.1.6. Заключение

Усилия разработчиков направлены прежде всего на обеспечение минимального объема при требуемой рабочей полосе. Данному критерию в наибольшей степени соответствуют объемные реализации антенн. Введение элементов коммутации в антенны является одним из перспективных направлений повышения характеристик антенн при малом объеме антенны.

Литература

1. Мальцев П.П., Матвеев О.В., Гнатюк Д.Л., Лисицкий А.П., Федоров Ю.В. Обзор реализаций встроенных антенн диапазона 5 ГГц с излучателем-монополем // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 9. С. 2–4.
2. Мальцев П.П., Матвеев О.В., Гнатюк Д.Л., Лисицкий А.П., Федоров Ю.В. Обзор реализаций планарных встроенных антенн диапазона 5 ГГц с минимальным объемом // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 10. С. 39–46.
3. Ali M., Sittironnarit T., Hwang H.-S., Sadler R. A., Hayes G. J. Wide-Band/Dual-Band Packaged Antenna for 5–6 GHz WLAN Application// IEEE transactions on antennas and propagation. 2004. Vol. 52. N 2. P. 610–615.

4. Wei-Yu Li, Kin-Lu Wong. Surface-Mount Loop Antenna for WWAN/WLAN/WiMAX Operation in the Mobile Phone//Microwave Conference 2008. APMC 2008. Asia-Pacific. P. 1—4.
5. Moon J.I., Park S.O. Small Chip Antenna for 2.4/5.8-GHz Dual ISM-Band Applications// IEEE antennas and wireless propagation letters. 2003. Vol. 2. P. 313—315.
6. Bhatti R.A., Choi J.H., Park S.O. Quad-Band MIMO Antenna Array for Portable Wireless Communications Terminals// IEEE antennas and wireless propagation letters. 2009. Vol. 8. P. 129—132.
7. Lee J., Hong S., Shin J., Choi J. A Compact Ultrawideband Monopole Antenna for Wireless Communication Application// IEEE transactions on antennas and propagation. 2009. Vol. 57. N 9. P. 2785—2788.
8. Патент WO2006084951A1. Internal monopole antenna/ Raappana A., Kupari M. et al// 17 Aug. 2006.
9. Park Y., Byun J., Harackiewicz F. J., Yu B., Kim B., Park M.-J., Chung Y.-S., Lee B. Multi-Band Diversity Antenna for Mobile Handset Applications// Proceedings for 2010 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and CNC/USNC/URSI Radio Science Meeting. 2010. July 11—17.
10. Saou-Wen Su, Jui-Hung Chou. Internal Wideband Monopole Antenna for MIMO Access-Point Applications//Antennas and Propagation Society International Symposium, 2008. AP-S 2008. IEEE, 5—11 July 2008. P. 1—4.
11. Yoshida S., Kameda S., Takagi T., Tsubouchi K. 5-GHz Band 3-Stacked Meander Line Antenna Using Multi-Layered Organic Substrates// Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), 2010 IEEE. 2010. P. 1—4.
12. Li L.W., Li Y.N., Hu L. Wideband and Low-Loss Metamaterials for Microwave and RF Applications: Fast Algorithm and Antenna Design// Metamaterials. 2010. P. 293—319.
13. Ranga Y., Matekovits L., Esselle K.P., Weily A.R. Multioctave Frequency Selective Surface Reflector for Ultrawideband Antennas// IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2011. Vol. 10. P. 219—222.
14. Wu C.Y.; Yeh S.H.; Lu T.H. Novel High Gain Metamaterial Antenna Radome for WiMAX Operation in the 5.8-GHz band// Antennas and Propagation Society International Symposium, 2007 IEEE. 2007. P. 3488—3491.
15. Antoniadis M.A., Eleftheriades G.V. A Broadband Dual-Mode Monopole Antenna Using NRI-TL Metamaterial Loading// IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2009. Vol. 8. P. 258—261.
16. Soon Ho Hwang, Tae Sik Yang, Joon Ho Byun, Kim, A.S. Design and Analysis of Metamaterial Antenna for Mobile Handset Application// 3rd European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2009. 23—27 March 2009. P. 3563—3566.
17. Dakhli N., Choubani F., David J. Multiband small zeroth-order metamaterial antenna// Applied Physics A: Materials Science & Processing, Online First™, 10 January 2011.
18. Qin P. Y., Weily A.R., Guo Y.J., Bird T.S., Liang C.H. Frequency Reconfigurable Quasi-Yagi Folded Dipole Antenna// IEEE transaction on antennas and propagation. 2010. Vol. 58, N 8. P. 2742—2747.
19. AbuTarboush H. F., Nilavalan R., Peter T. PIFA based Reconfigurable Multiband Antenna for Wireless Applications// Proceedings of the International Conference in Electromagnetic in Advanced Application, Sydney, Australia, 20—24 Sept. 2010. P. 232—235.
20. Viet-Anh Nguyen, Manh-Tuan Dao, Yun Tack Lim, Seong-Ook Park. A Compact Tunable Internal Antenna for Personal Communication Handsets// IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2008. Vol. 7. P. 569.
21. Grau A., Ming-Jer Lee, Romeu, J., Jafarkhani, H., Jofre, L., De Flaviis, F. A Multifunctional MEMS-Reconfigurable Pixel Antenna for Narrowband MIMO Communications// Antennas and Propagation Society International Symposium, 9—15 June 2007. P. 489—492.
22. Slater M. J., Pan H. K., Bernhard J. T. Preliminary Results in the Development of a Compound Reconfigurable Antenna// Proc. 2008 IEEE/URSI International Symposium on Antennas and Propagation, July 2008.
23. Ali M., Dougal R., Yang G., Hwang H.S. Wideband (5—6 GHz WLAN Band) Circularly Polarized Patch Antenna for Wireless Power Sensor // Proc. of Antennas and Propagation Society International Symposium, 2003. IEEE. 2003. Vol. 2. P. 34—37.

24. Payam Nayeri, Kai-Fong Lee, Atef Z. Elsherbeni, Fan Yang. Dual-Band Circularly Polarized Antennas Using Stacked Patches With Asymmetric U-Slots // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2011. Vol. 10. P. 492–495.
25. Hung-Chi Huang, Ken-Huang Lin, Hsin-Lung Su, Chin-Yih Wu, Hung-Hsuan Lin. Design of Dual-Polarized High-Gain Antenna Radome by Using Jerusalem Cross Metamaterial Structure// Antennas and Propagation Society International Symposium, 2009. (APSURSI'09). IEEE, 1–5 June 2009. P. 1–4.
26. Ghali H. A., Moselhy T. A. Broad-Band and Circularly Polarized Space-Filling-Based Slot Antennas// IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2005. Vol. 53, N 6. P. 1946–1950.
27. Heikkinen J., Kivikoski M. Low-Profile Circularly Polarized Rectifying Antenna for Wireless Power Transmission at 5.8 GHz// IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2004. Vol. 14, N 4. P. 162–164.
28. Европатент EP1158606A1. Dual-spiral-slot antenna for circular polarization/ Brankovic V., Krupcevic D. 28.11.2001
29. Caso R., Pino M. R., Nepa P., Manara G. A Novel Dual-Feed Slot-Coupling Feeding Technique for Circularly Polarized Patch Arrays// IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2010. Vol. 9. P. 183–186.

1.2. Обзор реализаций планарных встроенных антенн диапазона 5 ГГц с минимальным объемом¹

*Мальцев П.П., Матвеев О.С., Гнатюк Д.Л.,
Лисицкий А.П., Фёдоров Ю.В.*

1.2.1. Введение

В работе [1] рассмотрены вопросы разработки встроенных антенн диапазона 5 ГГц с излучателем-монополем, развитие которых происходит в направлении усложнения топологии монополя и земляного проводника, прежде всего для расширения полосы частот. В антеннах данного типа площадь земляного проводника существенно превышает площадь монополя и при этом возможности снижения размеров земляного проводника ограничены самим видом электромагнитного поля. Поэтому в целях уменьшения объема развиваются иные типы планарных антенн: вибраторные и щелевые антенны, антенны с фрактальной топологией, объемные антенны, многослойные антенны, перестраиваемые антенны. В настоящей работе рассмотрены результаты разработки планарных встроенных антенн диапазона 5 ГГц с минимальным объемом.

1.2.2. Вибраторные антенны

Многолетнее развитие антенн привело к неоднозначности обозначений излучателей. Так, на сайте Википедия объединены термины *вибратор* и *диполь*.

¹Нано- и микросистемная техника. 2011. № 10. С. 39–46.

Далее вибратор обозначает излучающую систему из пары отдельных проводников, на которые подается излучаемый сигнал. Петлевой вибратор обозначает проводящую петлю, при подаче излучаемого сигнала на один конец при заземленном втором.

Антенны данного типа, как и антенны с щелевыми излучателями, реализуются на диэлектрике с двухслойной (или однослойной) металлизацией и по технологичности близки к антеннам с монополями.

Вибраторная антенна вида, представленного на рис. 1 [2], имеет рабочие полосы 3,25–3,85 и 5,25–5,85 ГГц при размерах вибраторов со шлейфами $34 \times 14,1$ мм, толщине диэлектрика $h = 0,4$ мм и диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 4,4$.

Вибраторная антенна с изолированным резонатором между вибраторами показана на рис. 2 [3].

При размерах антенны 39×7 мм, $h = 0,8$ мм и $\varepsilon = 4,4$ обеспечена полоса 2,5–3,8 ГГц. Для подачи сигнала на вибраторы необходимо использовать фазорасщепитель.

При реализации вибратора из металла земляного проводника при двухсторонней металлизации диэлектрика нет необходимости в фазорасщепителе. Такие антенны описаны в ряде работ. В работе [4] приведена топология С-образных вибраторов (рис. 3), которая имеет рабочую полосу 2,5–4,8 ГГц.

В работе [5] изучена вибраторная антенна с щелевыми резонаторами круглого вида в каждом вибраторе (рис. 4), с щелевыми резонаторами ступенчатого вида и без резонаторов.

При резонаторах ступенчатого вида получены три узких полосы 2,4; 3,5; 5,3 ГГц при размерах антенны 50×50 мм, $\varepsilon = 6,15$; $h = 1,27$ мм. При круглых резонаторах наблюдаются две полосы и при отсутствии резонаторов — одна узкая полоса.



Рис. 1. Антенна с вибраторами со шлейфами. Кружки обозначают точки подачи сигнала



Рис. 2. Вибраторная антенна с изолированным резонатором между вибраторами



Рис. 3. Топологии сигнального и земляного проводников антенны с С-образными вибраторами.

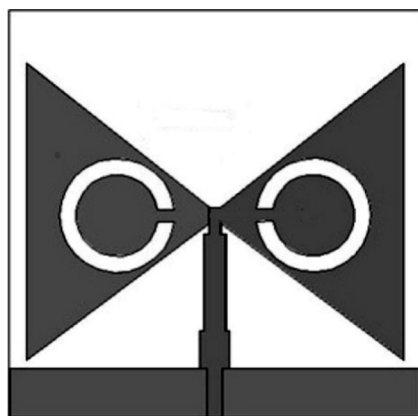


Рис. 4. Вибраторная антенна с щелевыми резонаторами круглого вида

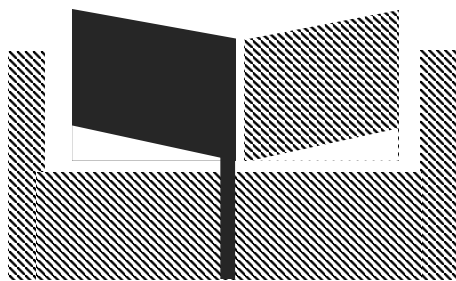


Рис. 5. Вид вибраторной антенны с неортогональными вибраторами. Штриховкой обозначен обратный (земляной) проводник

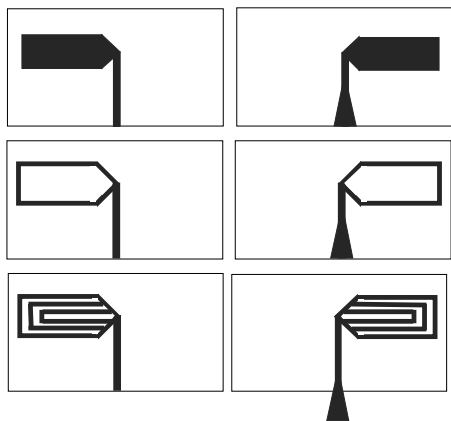


Рис. 6. Варианты вибраторных антенн

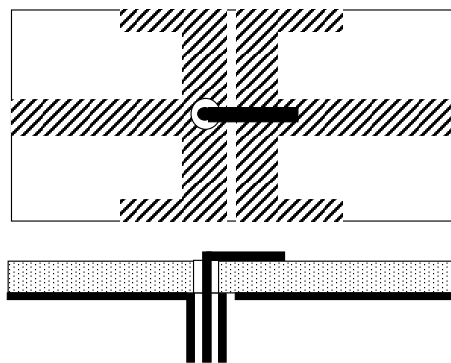


Рис. 7. Антенна с асимметричным возбуждением вибраторов отрезком микрополосковой линии (вид сверху и сечение)

Широкая рабочая полоса 1,82—6,56 ГГц при размерах антенны 48×30 мм получена для вибраторной антенны с неортогональными вибраторами (рис. 5) [6].

Вибраторы, показанные на рис. 6, сравнены в работе [7]. При размерах вибраторов 50×12 мм получены полосы для частот соответственно: 21%, 1,8 ГГц; 11%, 2,4 ГГц; 10%, 3,5 ГГц.

Антенна с подводом сигнала емкостной связью с вибраторами, обеспечивающая высокий коэффициент усиления диаграммы направленности (ДН) предложена в работе [8]. Вибраторы асимметрично возбуждаются отрезком микрополосковой линии (рис. 7). Коэффициент усиления ДН 7,5 дБи в рабочей полосе 2,39—2,52 ГГц и 9 дБи в полосе 4,93—6,13 ГГц соответственно. Размеры излучателя 30×26 мм, $\epsilon = 2,2$; $h = 0,5$.

В работе [9] исследованы петлевой вибратор Т-образного вида, выполненный на одной стороне подложки (*planar folded dipole antenna* (PFDA)), и его модификации: вибраторы выполнены на разных сторонах подложки (*both sided PFDA* (BPFDA)), подводящий фидер выполнен в виде компактного меандра (*compact BPFDA* (CBPFDA)). Показано, что последняя модификация не ухудшает характеристики антенны при существенно меньшей площади антенны.

В работе [10] описана антенна с парой петлевых вибраторов, изогнутых для экономии площади, как показано на рис. 8. Получена полоса 5,07—6,16 ГГц при размерах вибраторов 18×18 мм, $\epsilon = 4,4$; $h = 0,8$ мм.

Планарная реализация антенны типа Яги (рис. 9) показала невысокий коэффициент усиления кардиоидной ДН $> 5,6$ дБ и полосу 4,64—6,25 ГГц при размерах $35 \times 28 \times 1,6$ мм, $\epsilon = 4,4$ [11].

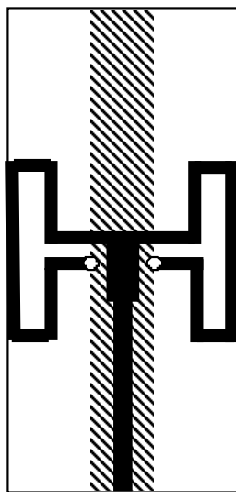


Рис. 8. Топология антенны с изогнутыми вибраторами

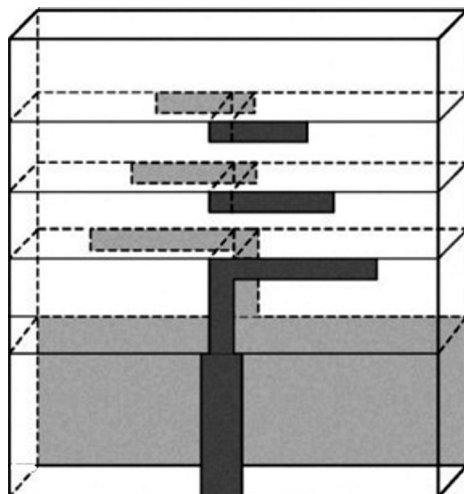


Рис. 9. Планарная реализация антенны типа Яги

Патент [12 20100231477] защищает антенну (рис. 10), реализующую концепцию заземленных вибраторов. Она имеет полосу 3,0–5,5 ГГц при размерах излучателя $20 \times 10 \times 0,8$ мм, что является минимальным объемом для широкополосной антенны. Этот результат обеспечен оптимально выбранными формой проводников и оптимизацией мест заземления сигнальных проводников.

Простая топология антенны из прямоугольных проводников оптимальной формы с копланарным подводом (рис. 11) [13] обеспечивает полосу 1,65–5,06 ГГц при размерах излучателей 45×39 мм, $\varepsilon = 4,4$; $h = 1,6$.

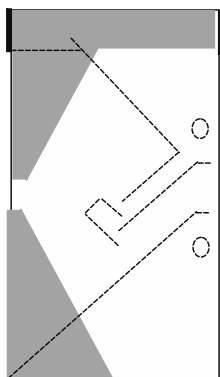


Рис. 10. Топология антенны с заземленными вибраторами. Штриховая линия обозначает контуры проводников на лицевой стороне, широкая линия на границе — соединение сигнального и земляного проводящих слоев

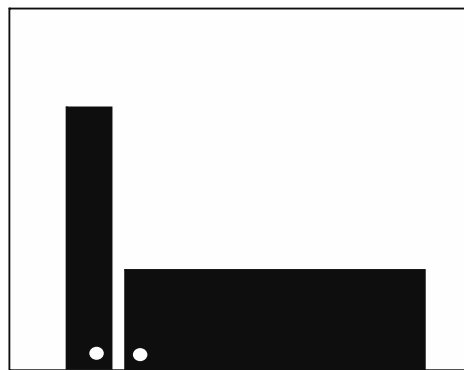


Рис. 11. Топология антенны из прямоугольных проводников

1.2.3. Антенны с щелевыми излучателями

Антенна с щелевыми вибраторами (рис. 12) обеспечивает полосу 8% на частоте 2,45 ГГц, полосу 13% на частоте 5,5 ГГц при сравнительно больших размерах 56×34 мм, $\epsilon = 4,34$; $h = 1,5$ мм [14].



Рис. 12. Антенна с щелевыми вибраторами

Компактный щелевой излучатель (рис. 13) обеспечивает уменьшение размеров на 34,5% до $9,5 \times 4,55$ мм, что сопровождается снижением рабочей полосы от 2,25% до 7,75% (для центральной частоты 5,25 ГГц) при размерах $5,5 \times 5,15$ мм и $\epsilon = 2,2$; $h = 0,508$ [15].

Спаренные щелевые антенны (рис. 14) [16] при общем размере $76 \times 30,3$ мм и $\epsilon = 4,5$ обеспечивают полосы 2,393–2,565 и 3,353–3,788 ГГц.

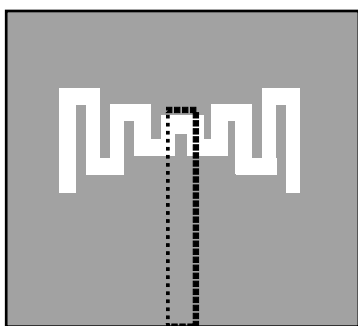


Рис. 13. Компактный щелевой излучатель



Рис. 14. Спаренные щелевые антенны

1.2.4. Использование фрактальных топологий антенн

Фрактальная структура может строиться двумя путями — усложнением контура фигуры или введением вырезов в площади фигуры, с уменьшением масштабов изменения на каждой итерации. В работах [17, 18] рассмотрены общие принципы построения фрактальных структур для антенн. В обзоре, посвященном фрактальным антеннам [19], в частности, указано, что применение фрактальных топологий обеспечивает малую площадь, многополосность антенны. Ниже рассматриваются реализации антенн диапазона 5 ГГц и менее с фрактальной топологией.

Трехслойная антенна — антенна с моноподем размером 54×54 мм, который имеет отверстия фракталы-Sierpinski (рис. 15), рассмотрена в работе [20].

Рассмотрен также вариант структуры с тремя разделенными диэлектриком проводящими квадратами поверх монополя, совпадающими по размерам с излучателем-монополем. Частотная зависимость S_{11} имеет у обеих антенн ряд недопустимо узких рабочих частотных полос. Таким образом, не всякое применение фрактала приводит к повышению характеристик антенны. В данном случае структура поля обычного монополя не изменилась качественно при введении отверстий согласно рис. 15, однако они породили новые резонансы.

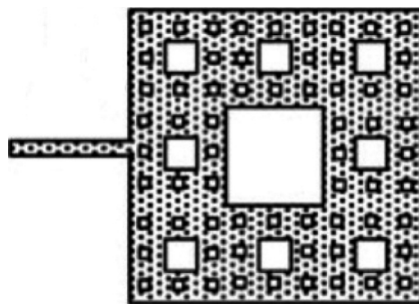


Рис. 15. Вид монополя с отверстиями-фракталами

Для фрактала Sierpinski, примененного к треугольному монополю [21] (рис. 16), получен ряд рабочих полос 0,62 ГГц — 7,5%; 1,74 ГГц — 9,04%; 3,51 ГГц — 20,5%; 6,95 ГГц — 22%; 13,89 ГГц — 25% при размере излучателя $88,9 \times 88,9$ мм и $h = 1,588$ мм и $\epsilon = 2,5$.

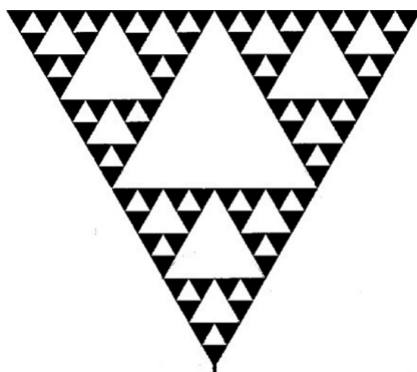


Рис. 16. Треугольный монополь с топологией фрактала Sierpinski

Монополь меньшей итерации фрактала (рис. 17) при размерах 66×66 мм обеспечивает рабочие полосы 2,4—2,5, 5,725—5,825 ГГц [22].

В работе [23] исследована антенна с монополем и отверстием в земляном проводнике, граница которого модифицирована как Koch-фрактал (рис. 18). Проведено сравнение антенн с различной итерацией фрактала. Найдено, что итерация фрактала должна быть оптимальной для достижения максимальной полосы. В оптимальной антенне два перекрывающихся частотных резонанса обеспечивают непрерывную полосу 62,3% с центральной частотой 2,465 ГГц. Размер антенны — 70×70 мм, размер отверстия с фрактальными краями — примерно 30×30 мм, $\epsilon = 4,1$; $h = 1,5$ мм.

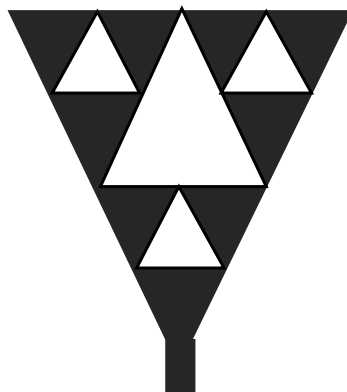


Рис. 17. Монополь меньшей итерации фрактала

Подобным образом для модификации края отверстия в земляном проводнике применен Koch-фрактал иного вида при более сложном монополе (рис. 19) [24]. Получены широкие рабо-

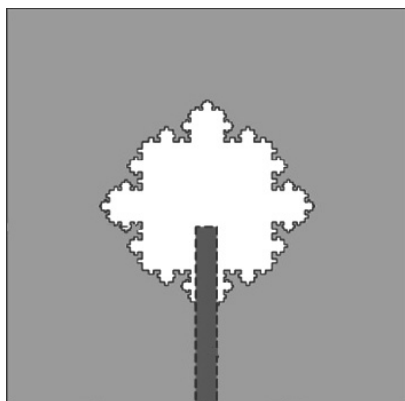


Рис. 18. Антенна с отверстием с фрактальными краями

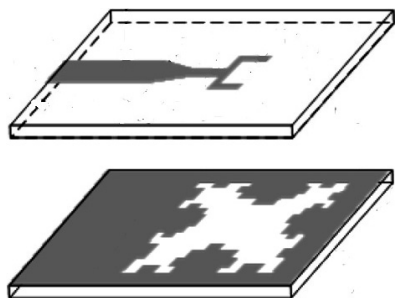


Рис. 19. Антенна с отверстием с фрактальными краями и моноподем сложной конфигурации (вид сверху и снизу)

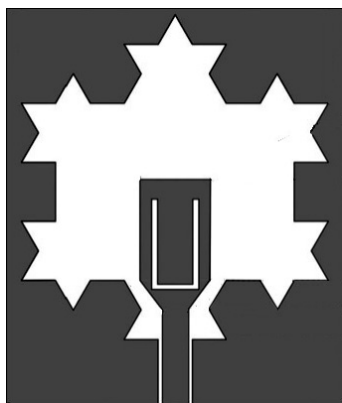


Рис. 20. Топология антенны с границей земляного проводника в форме фрактала

чие полосы 2,85—4,65 и 6,4—12 ГГц. Размер антенны — 28 × 24 мм — меньший из рассмотренных ранее антенн, что указывает на эффективность применения фрактальной топологии. Использована подложка $\epsilon = 2,65$; $h = 1$ мм.

Вариант выполнения границы земляного проводника в форме фрактала (рис. 20) описан в работе [25]. Проведено моделирование характеристик для материалов с ϵ от 2,2 до 10,2. Признано оптимальным $\epsilon = 4,4$: при размерах 33,5 × 28,5 мм измерения показали полосу 2,33—6,1 ГГц.

Фрактальная структура использована в топологии монополя, приведенного на рис. 21 [26]. Получены рабочие полосы — 50% для 1,14 ГГц, 19,5% для 4,25 ГГц, 15% для 7,6 ГГц при $\epsilon = 4,3$; $h = 1,53$ мм.

Вибратор, выполненный как фрактал Минковского второй итерации, описан в работе [27] (рис. 22). Получены полосы 2,30—2,48, 3,3—3,7 и 4,9—6,0 ГГц при общем размере 35 × 30 мм, размере монополя — 21,5 × 18 мм, $\epsilon = 3,35$; $h = 0,813$ мм.

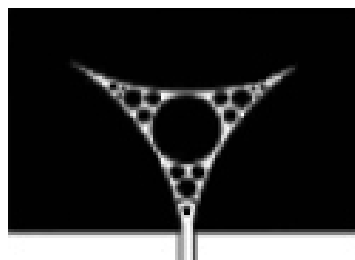


Рис. 21. Вид монополя с вырезами-фракталами

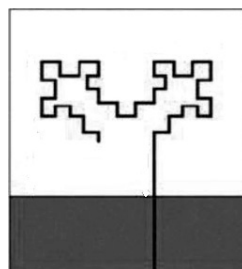


Рис. 22. Вибратор с формой фрактала Минковского

1.2.5. Заключение

Минимальные размеры антенн обеспечены оптимизацией топологии и точек заземления сигнальных проводников. В такой компактной топологии теряется деление элементов на общепринятые шлейф, вибратор, чему является примером антенна, приведенная на рис. 11. Фрактальные топологии не являются для антенн данного типа радикальным средством снижения размеров.

Примеры реализации показывают, что фрактальные топологии не обеспечивают существенного снижения объема для антенн данного класса.

Литература

1. Мальцев П.П., Матвеев О.В., Гнатюк Д.Л., Лисицкий А.П., Федоров Ю.В. Обзор реализаций планарных встроенных антенн диапазона 5 ГГц с излучателем монополюсом // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 9. С. 34—43.
2. Ting-Ming Hsueh, Heng-Tung Hsu, Hsi-Tseng Chou, Kwo-Lun Hung. Dual Band Omni-Directional Planar Antenna for WiMAX Applications // Proc. of Antennas and Propagation Society International Symposium, 2008. IEEE, 2008. P. 1—4.
3. Wen-Shan Chen, Shih-Hung Cheng. Characteristics of a Planar Dipole Antenna with a Parasitic Element // Proc. of Antennas and Propagation Society International Symposium, 2009 (APSURSI '09) IEEE, 2009. P. 1—4.
4. Kuramoto A. Wideband Antenna Using Unsymmetrical Planar Elements and Performance // Proc. of Antennas and Propagation Society International Symposium, 2007. IEEE, 2007. P. 5111—5114.
5. Tawk, Y., Kabalan K. Y., El-Hajj A., Christodoulou C. G., Costantine J. A Simple Multiband Printed Bowtie Antenna // IEEE. Antennas and Wireless Propagation Letters. 2008. Vol. 7. P. 557—560.
6. Kuo-Yung Chiu, Jen-Yea Jan, Hua-Ming Chen. Broadband Printed Dipole Antenna with a Pair of Sleeves for 2-6 GHz/WiMAX Application // Antennas and Propagation Society International Symposium, 2009. (APSURSI'09). IEEE, 2009. P. 1—4.
7. Pengfei Wu, Zhenqi Kuai, Xiaowei Zhu. Multiband Antennas Comprising Multiple Frame-Printed Dipoles // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2009. Vol. 57, N 10. Part. 2. P. 3313—3316.
8. Li R., Wu T., Tentzeris M. A Dual-Band Unidirectional Coplanar Antenna for 2.4-5-GHz Wireless Applications // Proc. of Microwave Conference, 2008. APMC 2008. Asia-Pacific, 2008. P. 1—4.
9. Nagatoshi, M., Yamano, T., Morishita, H. Broadband characteristics of Planar Folded Dipole Antenna with a Feed Line // Proc. of European Conference on Antennas and Propagation, 2009 (EuCAP 2009). 2009. P. 2807—2810.
10. Hsiao F.R., Wong K.L. Omnidirectional Planar Folded Dipole Antenna // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2004. Vol. 52, N 7. P. 1898—1902.
11. Li Z., Zhang X., Guo Q., Wang J. A Quasi-Yagi Microstrip Antenna with Simplified Feeding Structure // Proc. of 9th International Symposium on Antennas Propagation and EM Theory (ISAPE), 2010. P. 860—863.
12. Patent USA 2010/0231477A1. Small-size wide band antenna and radio communication device / Kuramoto A., Mochizuki T. Опубл. 16.09.2010.
13. Laila, D., Deepu, V., Sujith, R., Mohanan, P., Anandan, C.K., Vasudevan, K. Asymmetric Coplanar Strip Fed Wide Band Antenna // International Conference on recent Advances in Microwave Theory and Applications, 2008 (MICROWAVE 2008). P. 372—373.
14. Shams K.M.Z., Ali M. A CPW-fed Inductively Coupled Modified Bow-Tie Slot Antenna // Antennas and Propagation Society International Symposium. 2005 IEEE. 2005. Vol. 3B. P. 365—368.
15. Wi S.H., Kim J.M., Yoo T.H., Lee H.J., Park J.Y., Yook J.G., Park H.K. Bow-tie-shaped Meander Slot Antenna for 5 GHz Application // Antennas and Propagation Society International Symposium. 2002 IEEE. 2002. Vol. 2. P. 456—459.

16. Cheng-Feng Hou, Chien-Chang Huang. Dual-Band Bow-Tie Slot Antenna Fed by CPW for WiFi/WiMAX System Applications // Antennas and Propagation Society International Symposium, 2007 IEEE. 2007. P. 984–987.
17. Слюсар.В. Фрактальные антенны. Принципиально новый тип «ломаных» антенн. Ч. 2 // Электроника: наука, технология, бизнес. 2007. № 6. С. 82–89.
18. Слюсар.В. Фрактальные антенны. Принципиально новый тип «ломаных» антенн. Ч. 2 // Электроника: наука, технология, бизнес. 2007. № 6. С. 82–89.
19. Werner D. H., Ganguly S. An Overview of Fractal Antenna Engineering Research // IEEE Antennas and Propagation Magazine. February 2003. Vol. 45, N 1. P. 38–57.
20. Ban-Leong Ooi. A Modified Contour Integral Analysis for Sierpinski Fractal Carpet Antennas With and Without Electromagnetic Band Gap Ground Plane // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2004. Vol. 52, N 5. P. 1286–1293.
21. Puente-Baliarda C., Romeu J., Pous R., Cardama A. On the Behavior of the Sierpinski Multiband Fractal Antenna // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1998. Vol. 46, N 4. P. 517–524.
22. Krzysztofik W.J. Modified Sierpinski Fractal Monopole for ISM-Bands Handset Applications // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2009. Vol. 57, N 3. P. 606–615.
23. Wen-Ling Chen, Guang-Ming Wang, Chen-Xin Zhang. Bandwidth Enhancement of a Microstrip-Line-Fed Printed Wide-Slot Antenna With a Fractal-Shaped Slot // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2009. Vol. 57, N 7. P. 2176–2179.
24. Lui W. J., Cheng C. H., Zhu H. B. Compact Frequency Notched Ultra-Wideband Fractal Printed Slot Antenna // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2006. Vol. 16, N 4. P. 224–226.
25. Krishna D.D., Gopikrishna M., Anandan C. K., Mohanan P., Vasudevan K. CPW-Fed Koch Fractal Slot Antenna for WLAN/WiMAX Applications // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2008. Vol. 7. P. 389–392.
26. Tiwari A., Kumar R. On the Design of CPW-fed Apollonian Gasket Fractal Antenna // Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings, Moscow, Russia. 2009 August 18. P. 423–426.
27. Luo O., Salgado H.M., Pereira J. R. Fractal Monopole Antenna Design Using Minkowski Island Geometry // Antennas and Propagation Society International Symposium, 2009 (APSURSI '09). IEEE. 2009. P. 1–4.

1.3. Обзор реализаций встроенных антенн диапазона 5 ГГц с излучателем-монополем¹

*Мальцев П.П., Матвеев О.С., Гнатюк Д.Л.,
Лисицкий А.П., Фёдоров Ю.В.*

1.3.1. Введение

Развитие коммерческих систем беспроводной персональной связи стимулировало интенсивные исследования в области планарных антенн S, L диапазонов, для которых важны минимальные размеры, согласование в требуемых полосах и требуемый вид диаграммы направленности (ДН) при массовой технологии изготовления антенны. Портативное устройство (и его антенна) должно функционировать в нескольких диапазонах. Ниже подробно описано

¹Нано- и микросистемная техника. 2011. № 9. С. 34–44.

развитие встроенных антенн диапазона 5 ГГц с излучателем-монополем для следующих диапазонов:

- WLAN/WiMax wireless applications 2,4/3,5/5 ГГц в основном 2,4, 5 ГГц (WLAN bands (2,4—2,48 ГГц, and IEEE802.11a WLAN applications: 5,15—5,35 and 5,725—5,825 ГГц);
- UWB сверхширокополосные радиосистемы (3,1—10,6 ГГц);
- беспроводная связь LAN 5,15—5,825 ГГц (IEEE 802.11a);
- Fixed Broad Wideband Access (FBWA) 3,5 ГГц.

Таким образом, рабочий диапазон планарной антенны системы беспроводной связи помимо диапазона в области 5 ГГц имеет одну или более полос на более низких частотах.

Антенны типа Printed inverted-F antenna (PIFA), применимые в указанных полосах, рассмотрены в обзоре [1].

Принято, что достаточным согласованием входа антенны является уровень коэффициента отражения S_{11} менее -10 дБ (или КСВ менее 2) в 50-омном тракте. Так как алгоритмы оптимизации параметров излучателей произвольной конфигурации недостаточно эффективны, разработка встроенной антенны состоит из подбора требуемой конструкции (топологии при планарной реализации) с численным электродинамическим расчетом диаграммы направленности и коэффициента отражения входа в 50-омном тракте для каждой конструкции. Постоянным требованием для встроенных антенн являются минимальные размеры, так как антенны предназначены для малогабаритных портативных устройств. Хотя возможно введение согласующей цепи на входе антенны, такой путь улучшения согласования не применяется, так как требуются минимальные площадь (габаритные размеры) излучателя. Далее под размерами антенны указываются размеры подложки, на которой выполнена описываемая антенна.

Встроенные антенны целесообразно классифицировать по числу диапазонов, по типу излучателя (монополь, симметричный и несимметричный вибраторы, петлевой вибратор, щелевой излучатель), по виду и степени направленности диаграммы направленности.

Так как планарные встроенные антенны реализуются, как правило, на основе диэлектрика с металлизацией обеих сторон (созданием проводников стороны излучателя и со стороны узла земляного проводника на обратной стороне), для них термин «двухслойный» в описании опускается.

1.3.2. Развитие встроенных антенн на основе монополя

Монополем называется проводник, к которому подводится СВЧ-сигнал для излучения (*monopol*, также более общий термин — *patch*). Монополь просто реализуется из пластины диэлектрика, металлизированного с обеих сторон. Между монополем и земляным проводником антенны имеется электромаг-

нитная связь, которая, по сути, замыкает монополь и земляной проводник в излучающий контур сложной формы. К излучателям — монополям — целесообразно отнести излучатели из нескольких емкостно связанных проводников. Антенна на основе планарного монополя имеет форму диаграммы направленности (ДН), близкую к тороидальной (*omnidirectional*) в Е-плоскости и равномерную в Н-плоскости, а также линейную поляризацию. Размер антенного устройства может быть оценен как размерами земляного проводника, так и размерами монополя. В последнем случае следует учитывать, что по мере снижения размеров земляного проводника возрастает рассогласование и меняется ДН.

В диапазоне до 5,8 ГГц монополярная антенна является самым применяемым типом антенны. Предложено большое число вариантов модификации топологии, направленных на обеспечение согласования и уменьшения габаритных размеров. Планарные антенны, работающие на меньших частотах, представляют интерес, так в данном случае остро стоит проблема уменьшения размеров, что важно для рассматриваемого диапазона.

Важность уменьшения размеров стимулировала исследования по модификации простейшего монополя (прямоугольного или круглого). В работе [2] в монополь введены щели, топология которых оптимизируется для достижения требуемой полосы (рис. 1). Получена полоса 2,5–2,69 ГГц при экономии площади 37,14%. Размер монополя $28,3 \times 24,3$ мм при $\epsilon = 4,34$; $h = 1,5$ мм (толщина диэлектрика).

Для диапазона 5,15–5,35 ГГц предложено обычный круглый монополь вырезами преобразовать в N-образный, подвод сигнала производить в оптимальной точке, ввести второй слой диэлектрика или воздушную прослойку между основным (верхним) диэлектриком и проводящим земляным слоем (рис. 2) [3]. Получена экономия площади более 60% при увеличении ширины рабочей полосы для $\epsilon_1 = 2,2$; $h_1 = 1,575$ (нижний слой диэлектрика $\epsilon_2 = 1$; $h_2 = 3,2$ мм).

Компактная антенна на основе E-образного монополя с подводом сигнала вертикальным фидером в оптимальной точке (рис. 3) обеспечивает полосу 5,15–5,95 ГГц при размерах монополя $32 \times 23,1$ мм при $h = 3,5$ мм [4, 5].

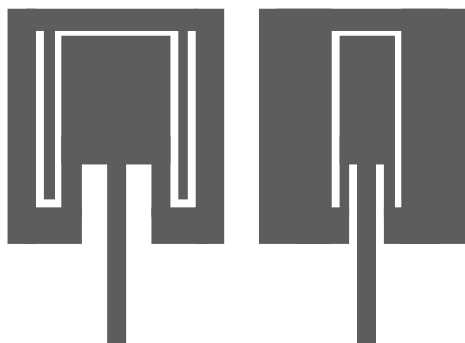


Рис. 1. Топологии модифицированных монополей

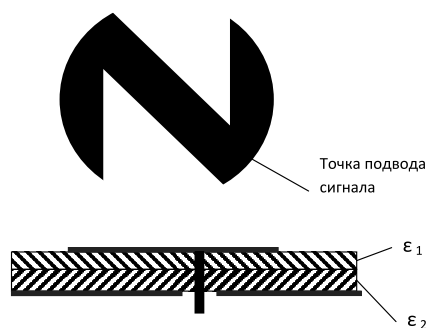


Рис. 2. Антенна на основе N-образного монополя

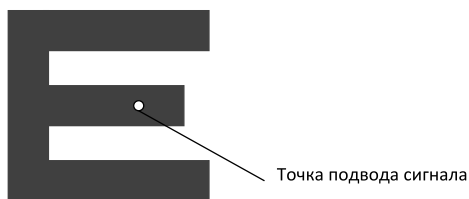


Рис. 3. Антенна на основе E-образного монополя с подводом сигнала вертикальным фидером

В работе [5] описана модификация данной антенны с микрополосковым подводом (рис. 4), которая обеспечивает полосу 5,03–6,12 Гц при размерах монополя $33,2 \times 22,2$ мм и $h = 2,5$ мм. Прирост полосы связан с тем, что излучатель выполнен в третьем слое выше микрополосковой подводящей линии, что обеспечивает согласование в большей полосе частот.

Монополь U-образного вида (рис. 5), излучающий через отверстие в верхнем проводнике, обеспечивает полосу 1,85–6,1 ГГц [6] при форме ДН, близкой к кардиоидной, размер окна в экране $L \times W = 47 \times 32$ мм, $\epsilon = 2,2$; $h = 1,57$ мм. Далее топология земляного проводника выделяется жирными линиями, обозначающими контур, или штриховкой.

Модификация монополя в виде разрезанного кольца (рис. 6) описана в [7]. При размерах излучателя 29×22 мм и $\epsilon = 3,0$; $h = 0,508$ мм обеспечены WLAN полосы 2,4–2,6 и 5,0–6,3 ГГц.

Несимметричный монополь (рис. 7) обеспечивает полосы 17,5% для 2,575 ГГц и 18,5% для 5,4 ГГц при размерах монополя (за пределами земляного проводника) 38×15 мм, $\epsilon = 4,34$; $h = 1,5$ мм [8].

Антенна из двух совмещенных монополей для 2 и 5 ГГц (рис. 8) при размерах излучателя 23×10 мм обеспечивает полосы 32% (1,68–2,32 ГГц) и 15% (4,95–5,8 ГГц) при $\epsilon = 2,2$; $h = 0,254$ мм [9].

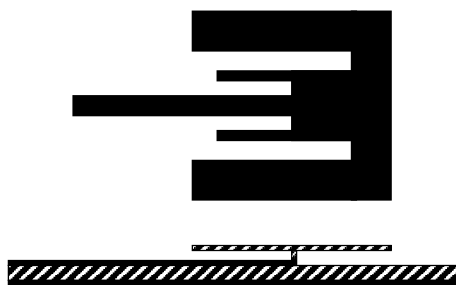


Рис. 4. Антенна на основе E-образного монополя с подводом сигнала микрополосковой линией

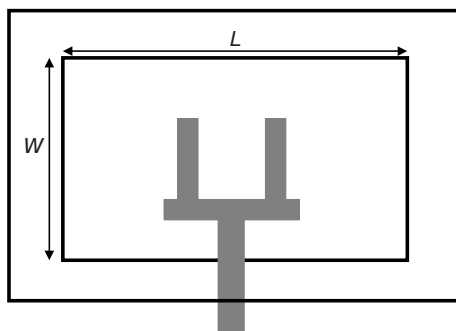


Рис. 5. Антенна с монополем U-образного вида, излучающим через отверстие

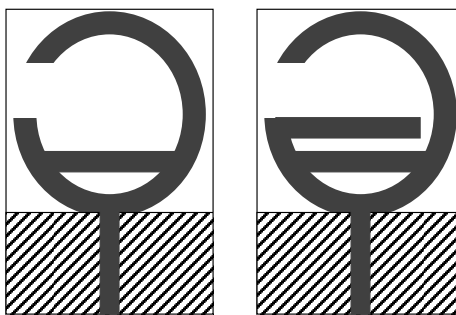


Рис. 6. Антенна на основе монополя в виде кольца

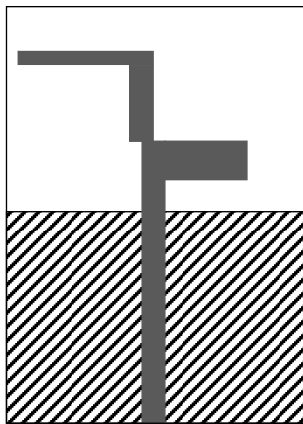


Рис. 7. Топология несимметричного монополя

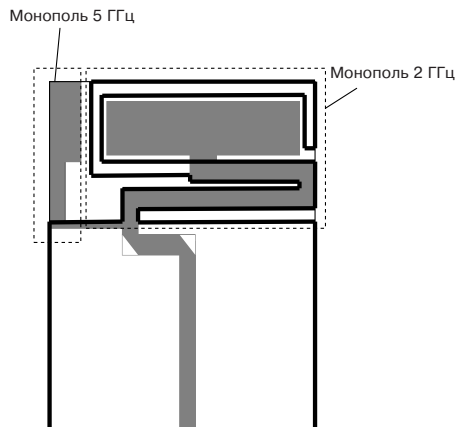


Рис. 8. Антенна из двух совмещенных монополей

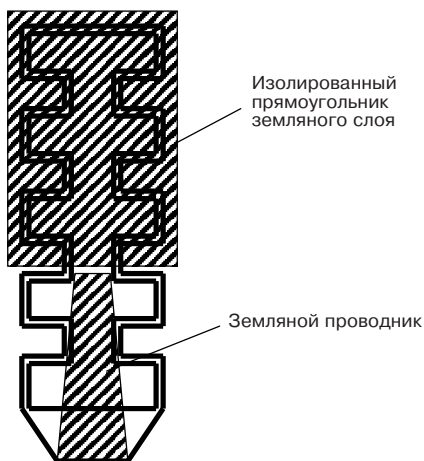


Рис. 9. Топология металлизации антенны с монополем в виде вибратора

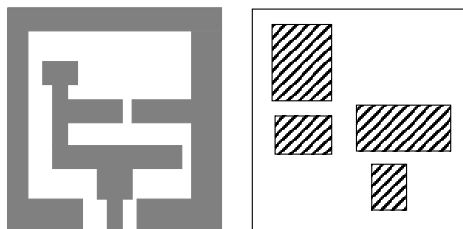


Рис. 10. Топологии монополя и резонаторов на обратной стороне

Монополь в виде компактного вибратора использован в антенне [10]. Земляной проводник продолжается на части длины вибратора (рис. 9). Получены рабочие полосы частот 10% (2,33—2,5 ГГц) и 28% для (5,25—7 ГГц) при весьма малых размерах $31,3 \times 8 \times 1,6$ мм, $\epsilon = 4,2$; $h = 1,6$ мм.

Для обеспечения требуемых характеристик создается электродинамическая связь монополя сложной формы, резонаторов на обратной стороне и земляного шлейфа (рис. 10) [11]. Полосы частот 2,38—2,60 и 5,13—5,73 ГГц. Размеры 20×20 мм, $\epsilon = 4,4$; $h = 1,6$ мм.

Введение полосковых и щелевых шлейфов в антенну с прямоугольным монополем обеспечивает полосу 2,12—6,58 ГГц при размерах 40×39 мм (рис. 11), $\epsilon = 4,4$; $h = 1,6$ мм [12].

Полосы 2,6, 3,5, 5,5 ГГц шириной 8,5, 41,5, 25,3% обеспечиваются антенной на основе монополя в виде шлейфов (рис. 12) при площади 30×25 мм, $\epsilon = 4,7$; $h = 0,8$ мм [13].

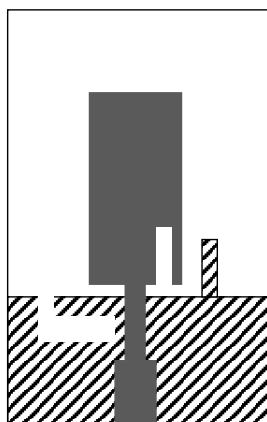


Рис. 11. Антенна с прямоугольным монополем и с полосковыми и щелевыми шлейфами

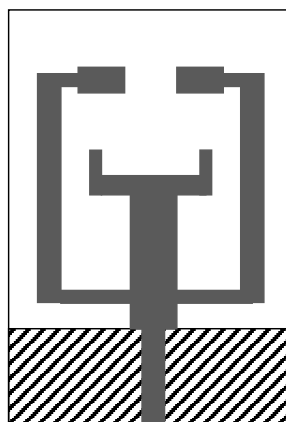


Рис. 12. Антенна на основе монополя в виде шлейфов

S-образный монополь с полосами 2,4 и 5,2/5,8 ГГц с малыми размерами излучателя $13,5 \times 8,5$ мм, $\epsilon = 4,34$; $h = 1,5$ мм описан в работе [14] (рис. 13).

Монополь в совокупности с вырезами в земляном проводнике (рис. 14) обеспечивает две полосы: 2,68–3,28; 4,74–9,58 ГГц при размерах $28,3 \times 24$ мм, $\epsilon = 4,34$; $h = 1,59$ мм [15].



Рис. 13. Топология S-образного монополя

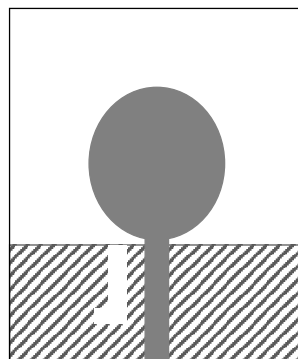


Рис. 14. Антенна на основе монополя с вырезами в земляном проводнике

Антенна, образованная емкостно связанными резонаторами в земляном слое металлизации и возбуждающим полоском (рис. 15), обеспечивает три полосы: 2,29–2,41, 3,29–3,4, 5,28–5,9 ГГц [16].

Монополь, образующий два контура (рис. 16) размером 54×52 мм, $\epsilon = 2,2$; $h = 0,254$ мм, обеспечивает рабочие полосы 30% для 1 ГГц, 50% для 2 ГГц и 40% для 5 ГГц [17].

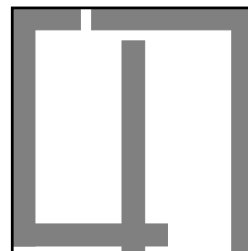
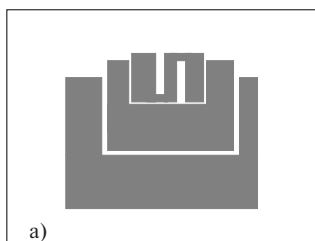


Рис. 15. Антенна, образованная емкостно связанными резонаторами в земляном слое металлизации (а) и возбуждающим полоском (б)

Рис. 16. Монополь, образующий два контура

Антенна с Г-образным монополем, емкостно связанная с земляным шлейфом (рис. 17), при размерах излучателя $12,5 \times 8$ мм, $\epsilon = 4,4$; $h = 1,6$ мм обеспечивает полосы 2,313–2,5; 3,93–6773 ГГц [18].

Необходимо отметить антенну для полос 1,9–2,2 и 2,5–2,8 ГГц (рис. 18), монополь которой выполнен в виде двух шлейфов. Ее особенность — малые размеры излучателя, его длина без подводящей линии всего 19,1 мм при $\epsilon = 3,48$; $h = 1,524$ мм [19].

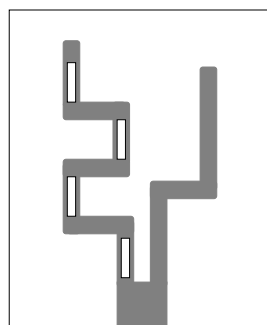
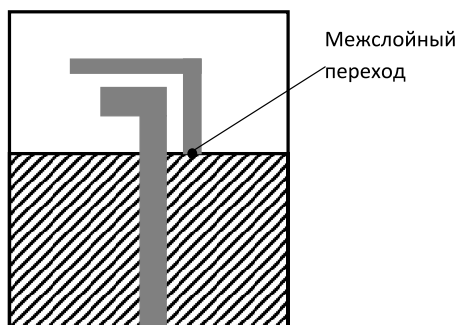


Рис. 17. Антенна с емкостно связанным излучателем

Рис. 18. Топология малогабаритной антенны с монополем в виде двух шлейфов

Излучатель с весьма малыми размерами с монополем в виде изогнутой линии (рис. 19) описан в работе [20]. При размерах излучателя 18×11 мм, $\epsilon = 2,2$; $h = 0,254$ мм получены рабочие полосы 40% для 2 ГГц и 10% для 5,8 ГГц.

Построение излучателя в виде линии рассмотрено в работе [21], исследующей монополь, построенный из двух отрезков линий (рис. 20), обеспечивающий полосы 2,22–2,55, 4,66–6,32 ГГц при размерах излучателя 12×7 мм, $\epsilon = 4,4$; $h = 1,6$ мм. Приведено сравнение размеров, близких по топологии антенн.

В работе [22] показано, что Н-образный монополь обеспечивает уменьшение площади излучателя на 50% относительно прямоугольного.

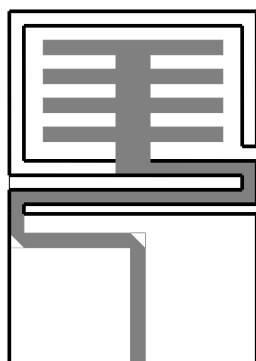


Рис. 19. Излучатель с монополем в виде изогнутой линии

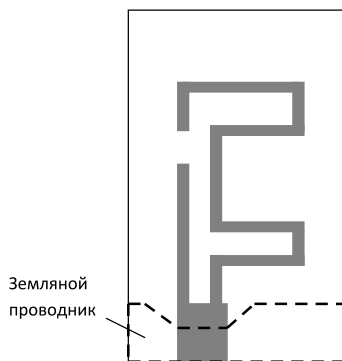


Рис. 20. Излучатель монополю из двух отрезков линий

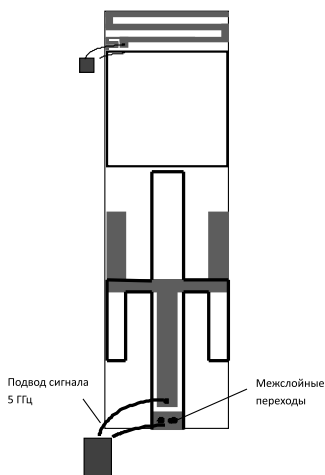
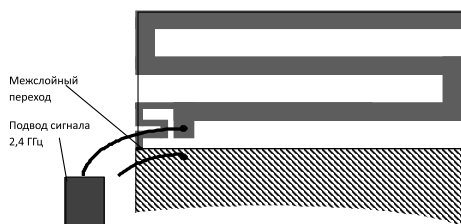


Рис. 21. Раздельные антенны диапазонов 2,4 и 5 ГГц

В работе [23] описаны раздельные антенны диапазонов 2,4 и 5 ГГц (рис. 21). Размер первого излучателя — $12 \times 9,5$ мм, второго — 35×12 мм при $\epsilon = 4,4$; $h = 0,8$ мм. Антенны разнесены на значительное расстояние, что увеличивает размеры устройства.

Многочисленные варианты топологии монополей защищены многочисленными патентами. Форма и размеры проводников оптимизируются для достижения прежде всего минимального отражения в требуемой полосе. В ряде патентов защищены различные варианты топологий антенн с монополями: рис. 22, *a* — [24], рис. 22, *б, в* [25], рис. 22, *г* — [26], рис. 22, *д* — [27], рис. 22, *е* — [28].

В ряде патентов защищаются топологии излучателей и размеры, например для простого монополюсного излучателя (рис. 23) [29].

В патентах [30—33] защищены топологии и размеры излучателей более сложного вида (рис. 24).

Антенны с оптимизированной топологией земляного проводника описаны в патенте [34] (рис. 25). Структура вида рис. 25, *б* образована симметричной линией с центральным проводником-излучателем и двумя земляными проводниками, соединенными межслойными переходами.

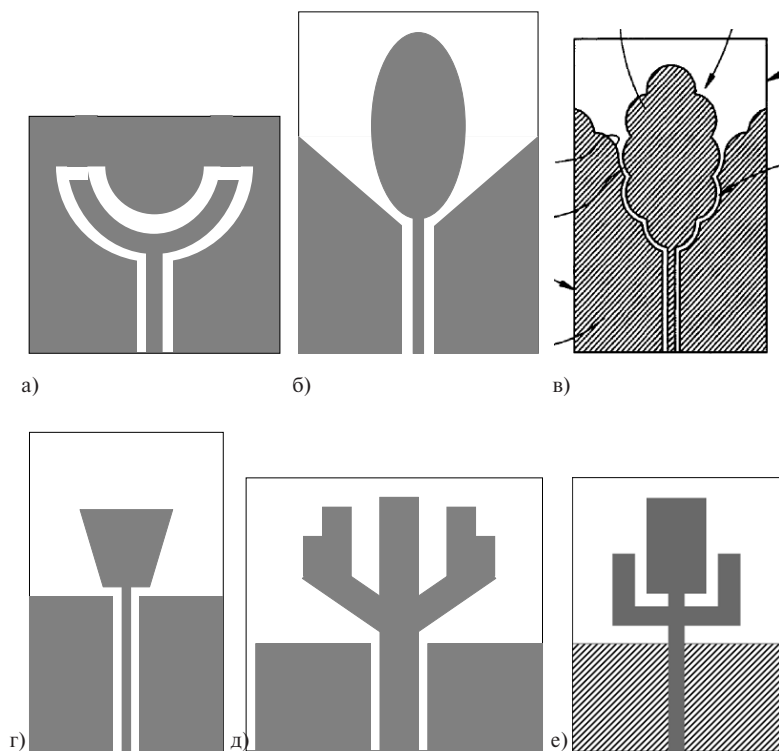


Рис. 22. Варианты топологий антенн с монополями

Компактный изогнутый монополюль на основе шлейфа защищается в патенте [35] (рис. 26).

В патенте [36] защищается схема согласования излучателя монополя и чипа — источника сигнала (рис. 27). Существенным является подвод сигнала к монополю в двух точках.

Оптимизация размеров топологии является неотъемлемым этапом разработки планарной антенны. В работе [37] описаны результаты машинного моделирования антенны, в которой копланарный ввод подает сигнал на монополюль через зазор (рис. 28). Обеспечена одна полоса 5,16—5,34 ГГц при КСВ < 2. Размер 18,8 × 12,3 мм, $\epsilon = 2,2$.

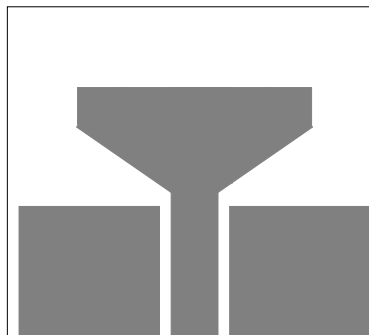


Рис. 23. Защищаемая топология монополюльного излучателя

Короткий отрезок копланарной линии с оптимальными размерами, размещенный на противоположной подводящему микрополоску, показанный на рис. 29, образует антенну с рабочими частотами 2,19—2,52 и 4,84—6,07 ГГц [38]. Размер антенны 24,1 × 9 мм, $\epsilon = 4,7$; $h = 1,6$ мм.

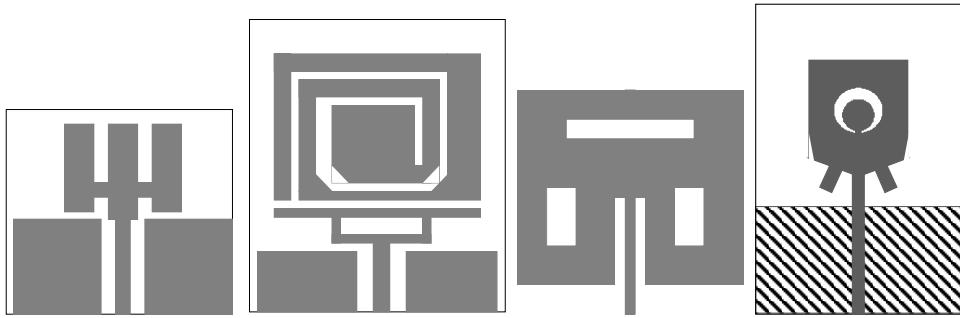


Рис. 24. Варианты защищаемых топологий монополюсного излучателя

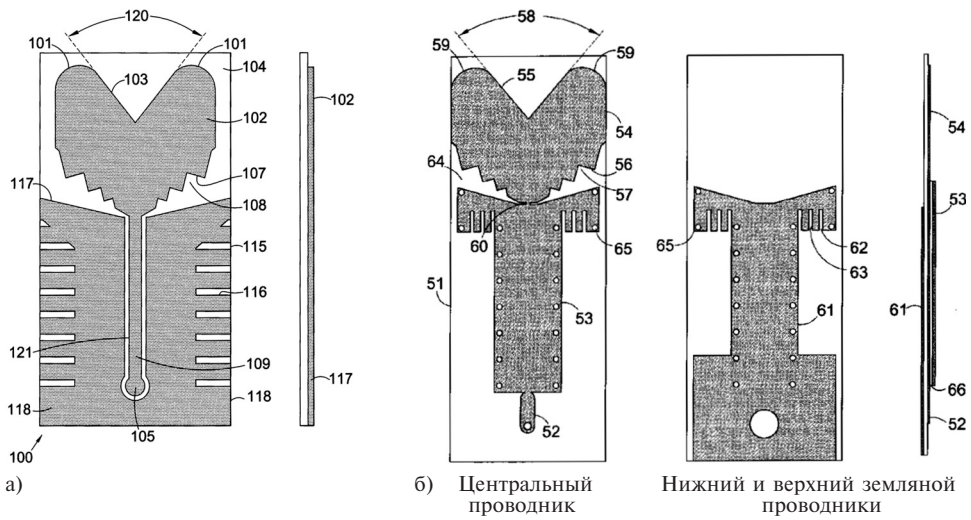


Рис. 25. Антенны с оптимизированной топологией земляного проводника

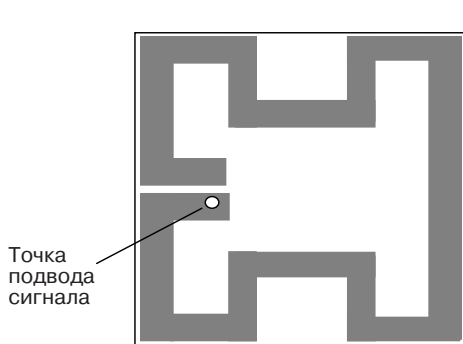


Рис. 26. Монополь на основе шлейфа

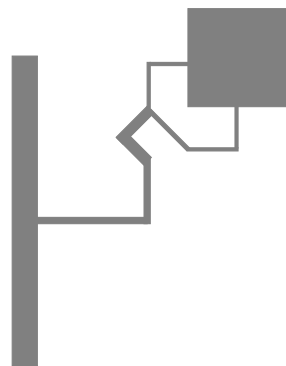


Рис. 27. Схема согласования излучателя монополя и чипа — источника сигнала



Рис. 28. Антенна с подачей сигнала на монополь через зазор

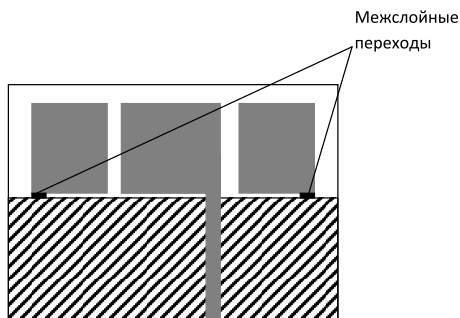


Рис. 29. Антенна, образованная отрезком копланарной линии

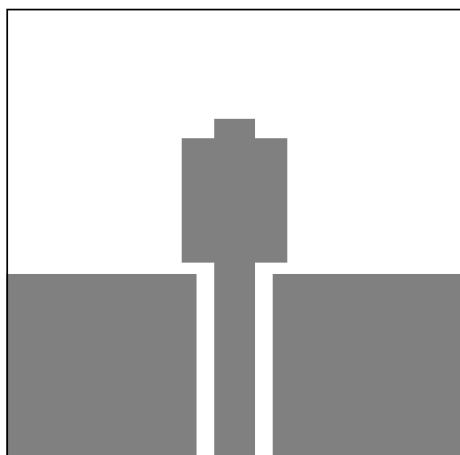


Рис. 30. Монополь с копланарным подводом сигнала

Оптимизированный вариант простого по форме монополя размером 12×6 мм с копланарным подводом сигнала (рис. 30) обеспечивает полосы 15% для 2,4 ГГц и 41,4% для 5,8 ГГц при $\epsilon = 4,4$; $h = 1,6$ мм [39].

1.3.3. Выводы

Планарные антенны на основе монополя разработаны во множестве вариантов. В данном обзоре рассмотрены характерные примеры, не претендующие на полноту. Важнейшими критериями являются минимальные размеры и согласование в требуемой полосе. Так как рассмотренные антенны применяются

в беспроводных каналах связи персональных устройств, в которых антенна располагается произвольным образом, при допустимости ДН, обеспечиваемой монополем, требования к форме ДН не являются приоритетными. Достигнутые размеры, оцениваемые по габаритным размерам излучателя, близки к минимальному значению, реализованному в значительном числе топологий (например, $12,5 \times 8$ мм [18]). Для дальнейшего снижения размеров антенны применяются объемные и многослойные структуры, фрактальные топологии, метаматериалы (*metamaterial*), частотно-селективные слои (*frequency selective surface (FSS)*), являющиеся предметом интенсивных исследований.

Литература

1. Слюсар В. Антенны PIFA для мобильных средств связи. Многообразие конструкций // Электроника НТБ. 2007. №1. С. 64—74.
2. Tlili B. Design of double C-slot microstrip patch antenna for WiMax application// Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI). 2010 IEEE. 2010. P. 1—4.
3. Moustafa A., Abdallah E.A., Hashish E.A. Novel Compact Circular N-Shaped Patch Antenna for 5.2 GHz // Radio and Wireless Symposium, 2008 IEEE. 2008. P. 727—730.
4. Ge Y., Esselle K.P., Bird T.S. Antennas for 5-6 ghz wireless communication systems // Multimedia Systems and Applications, 2006. Volume 27. Signal Processing for Telecommunications and Multimedia, Part 3. P. 269—280.
5. Ge Y., Esselle K.P., Bird T.S. E-Shaped Patch Antennas for High-Speed Wireless Networks // IEEE. Transactions on Antennas and Propagation. 2004. Vol. 52. N 12, P. 3213—3219.
6. Rao Q., Denidni T.A. Ultra-Wideband and Uni-Directional Radiation Slot Antenna for Multi-Band Wireless Communication Applications // Wireless Personal Communications. 2007. Vol. 41. N 4. P. 507—516.
7. Mehdipour A.; Sebak A.R.; Trueman C.W. Compact Microstrip-Fed Antenna for 2.4/3.5/5.2/5.8 GHz Wireless Communication Systems // Antennas and Propagation Society International Symposium. 2009. APSURSI '09. IEEE; 2009. P. 1—4.
8. Sun J., Feng Z. A Novel Compact Dual-band Printed Monopole Antenna // International Workshop on Antenna Technology: Small and Smart Antennas Metamaterials and Applications. 2007. IWAT '07. 2007. P. 139—142.
9. Li R., Pan B., Laskar J., Tentzeris M.M. Novel Low-Profile Broadband Dual-Frequency Planar Antenna for Wireless Handsets // IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION. 2008. Vol. 56. NO. 4. P. 1155—1162.
10. Khaleghi A. Dual Band Meander Line Antenna for Wireless LAN Communication // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2007. Vol. 55. Is. 3. Part: 2. P. 1004—1009.
11. Wang C.J., Lee J.J., Huang R.B. Experimental Studies of a Miniaturized CPW-Fed Slot Antenna With the Dual-Frequency Operation // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2003. Vol. 2. P. 151—154.
12. Jou C.F., Wu J.W., Wang C.J. Novel Broadband Monopole Antennas With Dual-Band Circular Polarization // IEEE Transactions on Antennas AND Propagation. 2009. Vol. 57. N 4. P. 1027—1034.
13. Lu J. H., Chou W. C. Planar Dual U-Shaped Monopole Antenna With Multiband Operation for IEEE 802.16e // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2010. Vol. 9. P. 1006—1009.
14. Tsai C.C., Hsia W.C., Huang C.Y. S-shaped Monopole Antenna for Dual-band WLAN Applications // Microwave Conference. 2007. APMC 2007. Asia-Pacific. 11-14 Dec. 2007. P. 1—3.
15. Antoniadis M.A., Eleftheriades G.V. A Compact Multiband Monopole Antenna With a Defected Ground Plane // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2008. Vol. 7. P. 652—655.
16. Zulkifli F.Y., Halim H., Rahardjo E.T. A Compact Multiband Microstrip Antenna using U and S Slots// Antennas and Propagation Society International Symposium, 2008. AP-S 2008. IEEE. 2008. P. 1—4.
17. Li R., Dejean G., Tentzeris M.M., Laskar J. Development of Multi-Broadband Planar Wire Antennas for Wireless Applications // Wireless Personal Communications. 2007. Vol. 42. N 1. P. 1—11.
18. Jan J.J., Tseng L.C. Small Planar Monopole Antenna With a Shorted Parasitic Inverted-L Wire for Wireless Communications in the 2.4-, 5.2-, and 5.8-GHz Bands // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2004. Vol. 52. N 7. P. 1903—1905.
19. Lin S., Wang G., Pan K., Ge X., Yang Y. A Novel Dual-Frequency Monopole Antenna for WCDMA and 2.5 GHz Extension Band // 2010 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). 2010. P. 362—365.
20. Pan B., Li R., Papapolymerou J., Tentzeris M.M., Laskar J. Low-Profile Broadband and Dual-Frequency Two-Strip Planar Monopole Antennas // Proc. of 2006 IEEE-AP Symposium, Albuquerque, NM, July 2006. P. 2665—2668.
21. Zhong S.S., Zhang L.N., Liang X.L. Compact Tri-Band Printed Monopole Antenna// International Workshop on Antenna Technology: Small and Smart Antennas Metamaterials and Applications, 2007. IWAT '07. 2007. P. 271—274.
22. Kumar R., Malathi P., Ganesh G. On the Miniaturization of Printed Rectangular Microstrip Antenna for Wireless Applications// Microwave and Optoelectronics Conference, 2007. IMOC 2007. SBMO/IEEE MTT-S International. 2007. P. 334—336.

23. Su S.W., Chou J.H. Hybrid of Monopole and Dipole Antennas for Concurrent 2.4- and 5-GHz WLAN Access Point // 3rd European Conference on Antennas and Propagation, 2009. EuCAP 2009; 2009. P. 545–548.
24. Patent CN CN201025630Y. Wide frequency band small printing antenna / WENXUN ZHANG DA MA. Оpubл. 20. 02. 2008.
25. Patent USA US2005156788A1. Ultra wideband planar printed volcano antenna / Ding-Fu Lin. Оpubл. 21.07. 2005.
26. Patent USA US2005280580A1. Ultra wideband planar monopole trapezoidal antenna / Ding-Fu Lin. Оpubл. 22.12. 2005.
27. Patent KR KR20090055927A. A non-dispersive UWB antenna apparatus using the multi-resonance / PARK JONG-KWEON, CHOI SAN-SUNG, PARK KWANG-ROH. Оpubл. 07. 09. 2009.
28. Patent USA US20040017315A1. Dual-band antenna apparatus/ Shyh-Tirng Fang, Hao-Chun Tung, Kin-Lu Wong. Оpubл. 29.01. 2004.
29. Patent USA US5828340A. Wideband sub- wavelength antenna / J.M.Jonson. Оpubл. 27.10. 1998.
30. European Patent EP1552079A1. Miniaturized ultra-wideband microstrip antenna / Myoung So-ung-ho et all. Оpubл. 06.07.2005.
31. Patent USA US20080094284A1 / Antenna with coupling feeding/ Chia-Hao Mei. Оpubл. 24.04.2008.
32. Patent USA US2008258989A1. Slot-loaded microstrip antenna and related methods / Qinjiang Rao et all. Оpubл. 23.10. 2008.
33. Patent USA US20060103577A1. Ultra wideband internal antenna / Jae Chan Lee. Оpubл. 18.05.2006.
34. Patent GB GB2439110A. Printed ultra-wideband antenna with reduced aperture clutter / Lye Whatt Chua. Оpubл. 19.12.2007.
35. WO200784080A1. Antennas / Zhang Y.P. Оpubл. 26.07.2007.
36. European patent EP510798A1. Oscillating apparatus / Shiga Nobuo. Оpubл. 28.10. 1992.
37. Shanmuganatham T., Raghavan S. Analysis and Design of Compact Coplanar Waveguide Fed Slot // International Conference on Recent Advances in Microwave Theory and Applications, 2008. MICROWAVE 21-24 Nov. 2008; 2008. P. 26–28.
38. Rohith K. Raj, Manoj Joseph, Aanandan C. K., Vasudevan K., Mohanan P. A New Compact Microstrip-Fed Dual-Band Coplanar Antenna for WLAN Applications // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2006. Vol. 54. N. 12, P. 3755–3762.
39. Han G., Wang W., Tingting An, Zhang W. Compact Dual-Band CPW-Fed Antenna // International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology, 2008. ICMMT 2008; 2008. Vol. 1. P. 395–397.

1.4. Интегрированные антенны на наногетероструктурах арсенида галлия¹

Матвеевко О.С., Гнатюк Д.Л., Галиев Р.Р.

РНЕМТ структуры с псевдоморфно напряженной квантовой ямой (КЯ) типа AlGaAs/InGaAs/GaAs обладают большей подвижностью μ_e и большей концентрацией n_S двумерного электронного газа, а также более конструктивно сложные и продуманные в отличие от традиционных структур типа n -GaAs/ i -GaAs или n -AlGaAs/GaAs и широко применяются в устройствах СВЧ-техники. Концентрация и подвижность электронов определяют ток стока транзистора, а толщина широкозонного барьера (расстояние от КЯ до поверхности или затвора транзистора) определяет крутизну транзистора.

После проведенных исследований и оптимизации по толщине барьерного слоя Al_xGa_{1-x}As, уровню легирования δ -Si слоя, составу и ширине канала

¹Нано- и микросистемная техника. 2011. № 12. С. 50–51.

$\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$, нами была выращена приборная гетероструктура, поперечное сечение и параметры которой представлены ниже.

$n^+-\text{GaAs}$ (Si) ($6 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$)	43,0 нм
$i\text{-Al}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As}$	17,0 нм
$\delta\text{-Si}$	
$i\text{-Al}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As}$ спейсер	5,2 нм
$i\text{-In}_{0.19}\text{Ga}_{0.81}\text{As}$	11,5 нм
$i\text{-GaAs}$ буфер 2	0,35 мкм
AlGaAs/GaAs сверхрешетка	26,0 нм
$i\text{-GaAs}$ буфер 1	41,0 нм
GaAs substrate (100)	

Электрофизические параметры полученной гетероструктуры:

- при $T = 300 \text{ К}$ — подвижность $\mu_e = 8480 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, концентрация $n_S = 1,29 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$;
- при $T = 77 \text{ К}$ — подвижность $\mu_e = 27900 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ концентрация $n_S = 1,28 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

Нашей задачей являлась разработка активных антенн для диапазонов частот 5 ГГц и 10—12 ГГц. От формы и размеров излучателя антенны зависит диаграмма направленности, коэффициент стоячей волны (КСВ) и диапазон принимаемых частот. Длина излучателя обратно пропорциональна резонансной частоте и корню квадратному из диэлектрической проницаемости [1]. Таким образом, высокая диэлектрическая проницаемость материала позволяет уменьшить размеры кристаллов со встроенными антеннами. Мы остановили свой выбор на РНЕМТ-структурах, т.к. их использование открывает возможность изготавливать интегрированную антенну со встроенным малошумящим усилителем компактных размеров.

Конструкция антенны выбиралась среди решений с возможностью планарной реализации. Мы остановились на антеннах двух типов: антенны типа Вивальди и прямоугольной микрополосковой антенны, каждый тип в двух вариантах: для диапазона 5 ГГц и 10—12 ГГц. Для того чтобы антенный элемент с наибольшей эффективностью передавал падающую электромагнитную волну на усилитель, импедансы антенны и усилителя должны быть комплексно сопряженными. Чтобы не включать отдельную согласующую цепь, мы подбирали импеданс антенны под импеданс усилителя, изменяя параметры микрополосковой линии.

Электромагнитный расчет ожидаемых СВЧ-параметров малошумящего усилителя (МШУ) выполняется в САПР ADS (Advanced Design System) с помощью метода Momentum. Для расчета антенных элементов использовался метод расчета FEM (Finite Element Method). Расчетные характеристики МШУ: коэффициент усиления ~ 18—24 дБ; коэффициент шума менее 1 дБ; КСВ по входу и по выходу < 2 дБ.

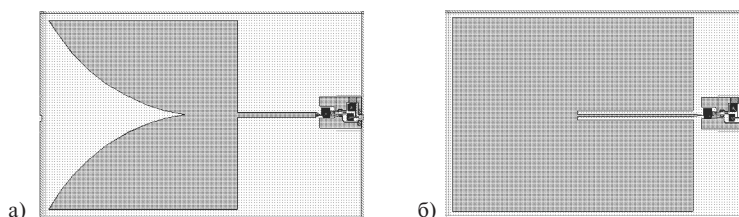


Рис. 1. Топология интегрированных антенных элементов для диапазона частот 5 ГГц: *a* — антенна типа Вивальди, *б* — прямоугольная антенна

Размеры кристаллов антенных элементов с МШУ составили $6,4 \times 10,1$ мм (антенна типа Вивальди) и $6,4 \times 5,4$ мм (прямоугольная антенна) для диапазона частот 5 ГГц (рис. 1). Кристаллы для диапазона 10–12 ГГц имеют более компактные размеры: $1,89 \times 6,77$ мм (антенна типа Вивальди) и $6,4 \times 9,4$ мм (прямоугольная антенна) [2–4].

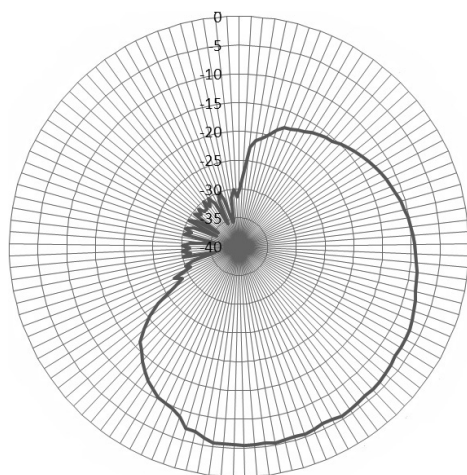


Рис. 2. Измеренная диаграмма направленности прямоугольного антенного элемента

Толщина подложки GaAs: 0,6 мм. Потери отражения антенных элементов типа Вивальди: от -20 до -35 дБ в диапазоне 10–12 ГГц и -17 дБ для 5 ГГц; для прямоугольных антенных элементов: от -10 до -15 дБ в диапазоне 10–12 ГГц и -15 дБ для 5 ГГц. Максимальная интенсивность излучения антенных элементов: 0,036 Вт/стер. Максимальное усиление: 0,93.

На данный момент нам удалось измерить характеристики одного антенного элемента: прямоугольного для 5 ГГц. Коэффициент отражения составил около -13 дБ на частоте 5,5 ГГц. Диаграмма направленности представлена на рис. 2.

Литература

1. John Dr., Volakis L. Antenna engineering handbook. New York: The McGraw-Hill Companies, 2007.
2. Мальцев П.П., Федоров Ю.Ф., Матвеев О.С., Гнатюк Д.Л. Топология ИМС «Интегральный антенный элемент со встроенным маломощным усилителем для диапазона 5 ГГц», регистрационное свидетельство №2011630058 от 05.05.2011 г.
3. Мальцев П.П., Федоров Ю.Ф., Матвеев О.С., Гнатюк Д.Л. Топология ИМС «Интегральный антенный элемент со встроенным маломощным усилителем для диапазона 10–12 ГГц», регистрационное свидетельство №2011630059 от 05.05.2011 г.
4. Федоров Ю.Ф., Гнатюк Д.Л. Топология ИМС «Широкополосный маломощный усилитель», регистрационное свидетельство №2011630032 от 04.02.2011 г.

1.5. Обзор реализаций планарных антенн X-диапазона с двумя слоями металлизации¹

Мальцев П.П., Матвеев О.С., Гнатюк Д.Л.,
Лисицкий А.П., Фёдоров Ю.В., Бунегина С.Л., Крапухин Д.В.

1.5.1. Введение

Планарные антенны X-диапазона с двумя слоями металлизации как дешевые и технологичные разрабатываются для следующих систем:

- Ultra-Wideband (UWB)-систем (рабочий диапазон частот не менее 3,1–10,6 ГГц);
- систем спутникового телевидения.

В данной работе используется терминология обзора [1]. Полоса оценивается по уровню КСВ < 2 или по уровню $S_{11} < -10$ дБ.

Особенностями UWB антенн являются:

- необходимость изоляции канала (полосы режекции) в узких полосах не пропускания (*notch band*) в пределах рабочей полосы, что обеспечивается высоким рассогласованием входа антенны на данных частотах;
- равномерное распределение излучения в азимутальной плоскости, т.е. минимальные требования к коэффициенту усиления диаграммы направленности (ДН).

1.5.2. Развитие встроенных антенн на основе монополя

Обзор реализованных планарных антенн на основе монополей, копланарных, вибраторных антенн различных топологий диапазона 12 ГГц приведен в [2, 3].

Поиск оптимальной формы в настоящее время не может быть произведен средствами машинного проектирования, поэтому разработчики применяют различные эмпирические приемы, породившие значительное число реализаций монополей, из которых рассмотрены наиболее характерные, обеспечивающие UWB-полосу.

Как правило, в антеннах X-диапазона преднамеренно требуется изолировать диапазон в районе 5,4 ГГц. Характерным примером использования монополя является работа [4]. В ней описан излучатель (рис. 1) с дополнительным шлейфом, соединенным с монополем щелевым резонатором в месте присоединения подводящей линии и монополя, обеспечивающей согласование в полосах 1,4–4,8 и 6–11 ГГц (с одной полосой не пропускания). Антенна имеет значительные размеры — 72×66 мм, что связано с обеспечением рабочей полосы до 1,4 ГГц, $\epsilon = 4,4$; $h = 1,6$ мм.

¹Нано- и микросистемная техника. 2012. № 4. С. 45–54.

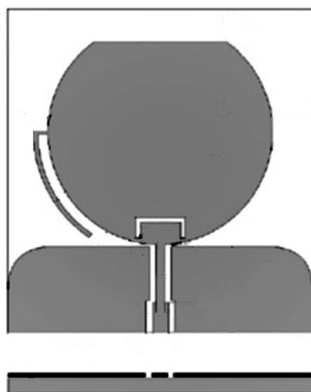


Рис. 1. Излучатель с дополнительным шлейфом, соединенным с монополем щелевым резонатором в месте присоединения подводящей линии и монополя

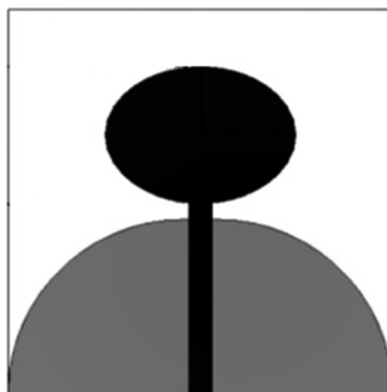


Рис. 2. Антенна с эллиптическим монополем

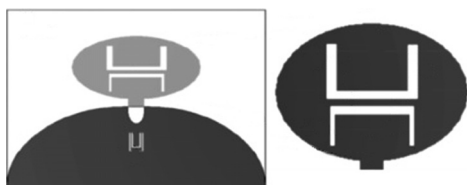


Рис. 3. Антенна с эллиптическим монополем с парой электродинамически связанных щелевых резонаторов

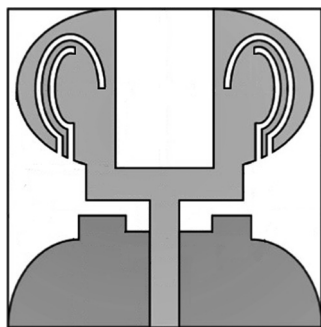


Рис. 4. Модификация эллиптического монополя

в полосе 3,2–14 ГГц. Размер антенны 36 × 30 мм, $\epsilon = 4,4$; $h = 1,6$ мм.

Компактные щелевые резонаторы введены в монополь и в земляной проводник (рис. 6) [8]. Достигнуто согласование в полосе 2,75–11,3 ГГц с исклю-

В работе [5] методами машинного моделирования исследована антенна с эллиптическим монополем. Топология (рис. 2) обеспечивает уникальную полосу 2–21 ГГц при габаритах 44 × 20 мм, $\epsilon = 4,7$; $h = 1,5$ мм.

Антенна, модифицированная парами электродинамически связанных щелевых резонаторов для эллиптического монополя (рис. 3), имеет полосы с высоким отражением (режекций) 3,4–3,69, 5,15–5,825, 8,5–9,5 ГГц.

Более глубокой модификации подвергнут эллиптический монополь в работе [6] (рис. 4). Получена рабочая полоса 2,2–11 ГГц с исключением частот 3,3–3,8 и 5,1–5,85 ГГц при размерах 20 × 20 мм и $\epsilon = 4,4$; $h = 1,0$ мм.

В работе [7] описана реализация антенны с оптимизированной формой проводников излучателя и земляного проводника (рис. 5). Экспериментально получено согласование

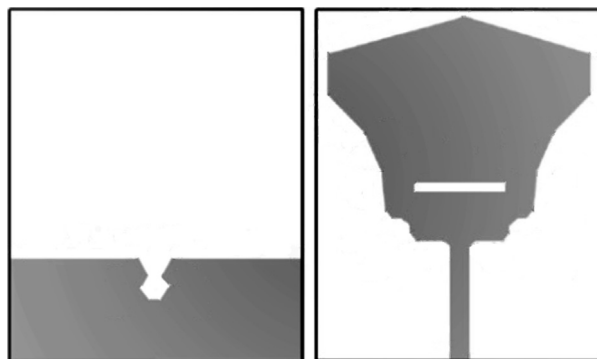


Рис. 5. Реализация антенны с оптимизированной формой проводников излучателя и земляного проводника



Рис. 6. Лицевой и земляной проводники антенны с компактными щелевыми резонаторами

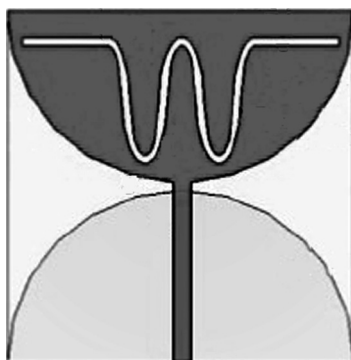


Рис. 7. Антенна на основе диполя со щелью

чением 3,25—4,20 ГГц и 5,23—6,10 ГГц при размере 35 × 35 мм и $\epsilon = 4,4$; $h = 1,6$ мм.

Монополь со щелью вида рис. 7 имеет рабочую полосу 3,1—11 ГГц при размерах 23,5 × 23 мм и $\epsilon = 3,38$; $h = 0,508$ мм [9].

Планарная антенна может быть выполнена несимметричной (рис. 8) [10]. Получена полоса 3,2—15,54 ГГц с режекцией полосы 4,7—5,8 ГГц при размерах 14,5 × 14,5 мм и $\epsilon = 4,6$; $h = 1,6$ мм, что является наилучшим соотношением полоса/габаритные размеры.

Круговые резонаторы, выполненные на стороне земляного проводника, обеспечивают рабочие полосы 2,8—3,8 и 8,3—10,1 ГГц (рис. 9) [11]. Размеры структуры — 48 × 40 мм, $\epsilon = 10,2$; $h = 0,635$ мм.



Рис. 8. Несимметричная планарная антенна

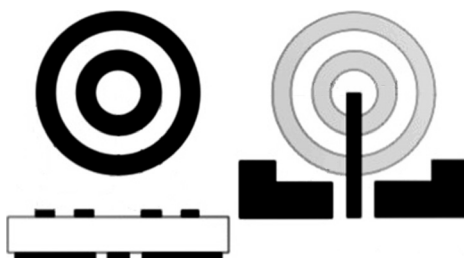


Рис. 9. Планарная антенна с круговыми резонаторами

Пара резонансных колец использована в монополе вида рис. 10 с согласованием в виде кольцевых резонаторов на обратной стороне [12]. Полоса — 3,05–23,8 ГГц с полосами режекции 3,4–4,0 и 4,92–6,0 ГГц, размер пластины 30×30 мм, $\epsilon = 4,4$; $h = 1,6$ мм.

Обеспечение точной полосы режекции может решаться как самостоятельная задача для разработанной широкополосной антенны. Так, в работе [13] описана численная оптимизация топологии монополя (рис. 11) с целью устранить прием сигнала в полосе 5,15–5,825 ГГц.

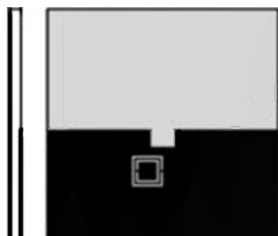


Рис. 10. Излучатель-монополь из кольцевых резонаторов

Рис. 11. Форма U-образного оптимизированного монополя

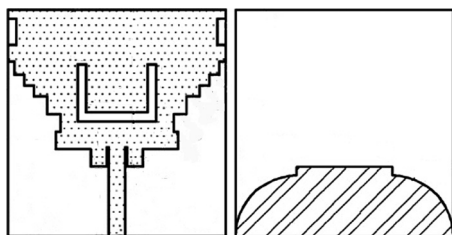


Рис. 12. Топология лицевой (а) и земляной (б) металлизации антенны со ступенчатой формой

Более сложная топология со ступенчатой формой (рис. 12) устраняет полосу 5–5,86 ГГц при рабочей полосе 2,9–14,5 ГГц [14]. Размеры монополя с подводящей линией (рис.12) — 26×25 мм, $\epsilon = 4,4$; $h = 1,6$ мм.

Введение пары щелевых резонансов в монополь (рис. 13) устранил две полосы: 3–3,6 и 5–6 ГГц [15].

Широкополосная антенна с эллиптическим монополем, выполненным несимметрично на стороне зем-

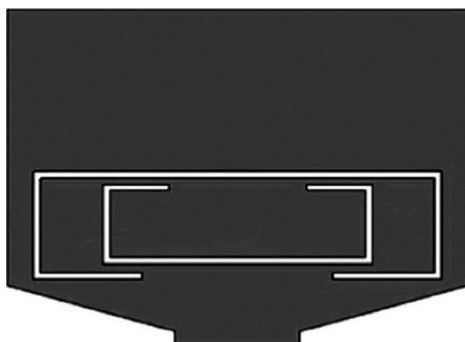


Рис. 13. Топология монополя с щелями



Рис. 14. Антенна с эллиптическим монополем

ляного проводника и соединенным с подводящей линией через сквозное соединение (рис. 14), обеспечивает полосу 3–11 ГГц без дополнительного согласования при размерах антенны 40×22 мм, $\epsilon = 2,33$; $h = 0,508$ мм [16].

Эта антенна, дополненная щелями (рис. 15), обеспечивает подавление полосы в окрестности 5,25 ГГц [16].

Подавление полос 5,15–5,96 и 5,27–5,94 ГГц для эллиптического монополя (рис. 16) реализовано подстроечными площадками с одной и с двух сторон от подводящей линии [17]. Размер антенны — 40×38 мм, $\epsilon = 4,5$; $h = 1,0$ мм. Полоса составляет 3–11,5 ГГц.

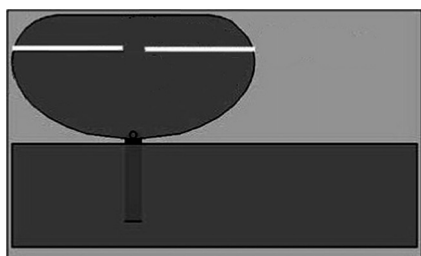


Рис. 15. Антенна с эллиптическим монополем с прорезями

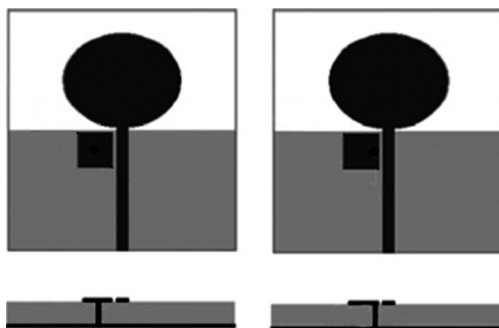


Рис. 16. Антенна на основе эллиптического монополя с дополнительным согласованием

Введение одного или пары резонаторов в U-образный монополю (рис. 17) приводит к подавлению полосы 4,98–6,03 ГГц [18]. Проведено моделирование топологии вида и ее модификаций (рис. 18), обеспечивающих подавление полосы 5–6 ГГц [19].

Вариант монополя, расположенного на границе диэлектрика, обеспечивает рабочую полосу 2,97–12,77 ГГц (с подавлением полосы 5,15–5,825 ГГц) (рис. 19) предложен в работе [20]. Достигнуты размеры 28×30 мм при $\epsilon = 3,5$; $h = 1,52$ мм.

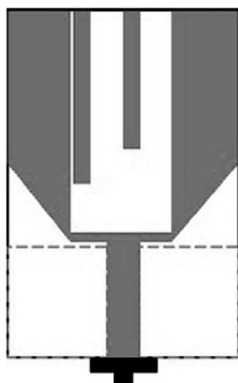


Рис. 17. Вариант топологии с резонаторами

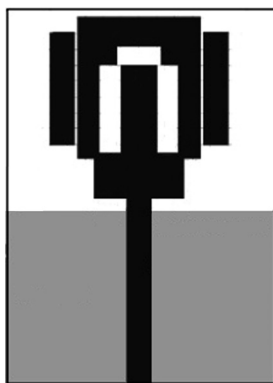


Рис. 18. Вариант модификации топологии с резонаторами

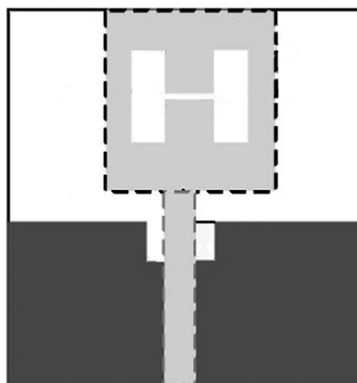


Рис. 19. Вариант топологии с монополем, расположенным на границе диэлектрика

В работе [21] описан широкополосный излучатель с монополем круглой формы (рис. 20) с полосой 2,8–10,66 ГГц, размером 25×25 мм, $\epsilon = 4,4$; $h = 1,6$ мм. Введение в монополь П-образной щели создает подавление полосы 3,73–6,15 ГГц.

Антенна-монополь с подстройкой шлейфами на земляном проводнике (рис. 21), представлена в [22]. При размерах 30×30 мм, $\epsilon = 4,4$; $h = 1,6$ мм обеспечена полоса 3,07–10,66 ГГц. Исследована возможность «включения-выключения» полосы режекции 5,01–5,89 ГГц при введении переключающих рп диодов в шлейфы земляного проводника.

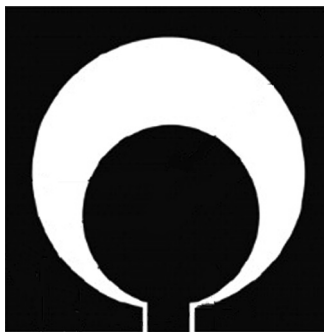


Рис. 20. Широкополосный излучатель с монополем круглой формы

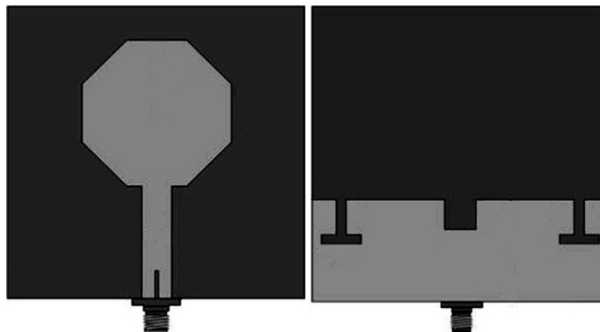


Рис. 21. Антенна с подстройкой шлейфами на земляном проводнике

В работах [23–26] предложены варианты широкополосных антенн с подавлением полосы 5,4 ГГц. В работе [27] описан компактный монополь, обеспечивающий размер антенны 17×16 мм при $\epsilon = 4,4$; $h = 1,6$ мм (рис. 22). Характерно, что две щели обеспечивают одну полосу режекции.

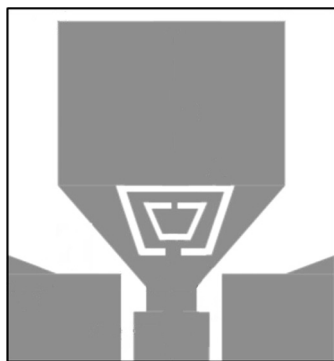


Рис. 22. Антенна-монополю с минимальными размерами

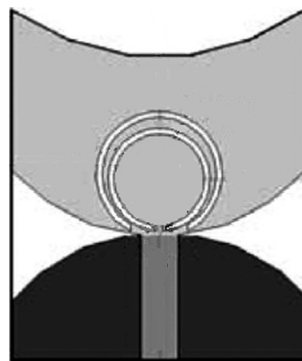


Рис. 23. Топология антенны с режекцией двух полос

Антенна, показанная на рис. 23, с размерами 30×25 мм, $\epsilon = 4,4$; $h = 1,5$ мм обеспечивает режекцию принимаемого сигнала в двух полосах 4,85–5,35 ГГц и 5,65–6,08 ГГц при общей полосе 3,08–12 GHz [28]. Каждая кольцевая щель обеспечивает одну полосу режекции. Реализованы и исследованы также топологии с одной и с тремя полосами режекции.

Антенна на основе квадратного монополя размером 15×10 мм, $\epsilon = 4,4$; $h = 1,0$ мм с щелями в обоих проводниках (рис. 24) описана и промоделирована в [29]. Получена полоса 3–13 ГГц с двумя полосами режекции.

Антенна (рис. 25) на основе монополя с фигурными щелями в монополе и земляном проводнике, обеспечивает подавление трех полос 3,3–3,9, 5,2–5,35, 5,8–6,0 ГГц. Размеры антенны — 36×34 мм, $\epsilon = 2,65$; $h = 1,0$ мм [30].

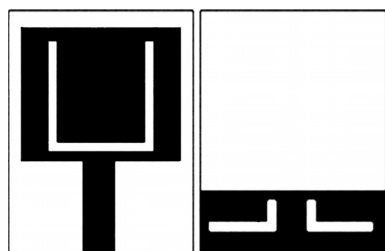


Рис. 24. Антенна на основе квадратного монополя с щелями с обеих сторон

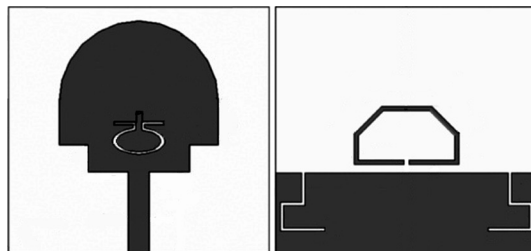


Рис. 25. Топология проводников антенны с фигурными щелями в монополе и земляном проводнике

Для устранения нежелательной полосы может быть применен фильтр в подводящей линии (рис. 26) [31]. Рабочая полоса 3–11 ГГц при полосе режекции 4,9–5,9 ГГц. Размеры антенны 27×27 мм, $\epsilon = 3,2$; $h = 1,52$ мм.

Оптимизация топологии в рамках допустимой площади путем введения набора щелей, шлейфов в верхний и нижний проводники может привести

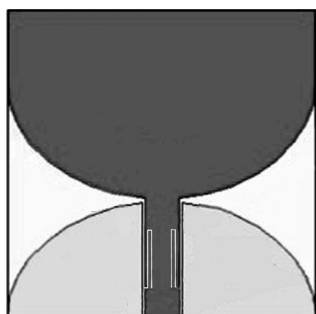


Рис. 26. Монопольный излучатель с фильтром

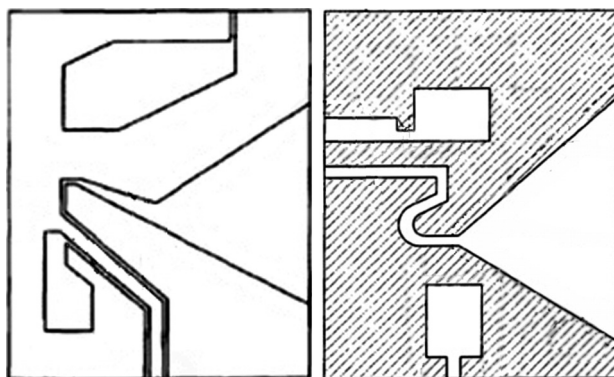


Рис. 27. Топологии излучателя с набором шлейфов и щелей

к топологии с весьма сложным видом излучателя. В патенте [32] защищается планарная антенна, имеющая монополь с оптимизированными врезами в обоих проводниках (рис. 27). Достигнута полоса 3–10,8 ГГц.

Излучатели подобного вида описаны в [33]. Топология и частотная зависимость показаны на рис. 28. Важным достоинством данной антенны является высокая направленность (рис. 29). Полоса 2,93–10,67 ГГц (по уровню КСВ < 2). Размер антенны 30×20 мм, $\epsilon = 10,2$; $h = 1,27$ мм.

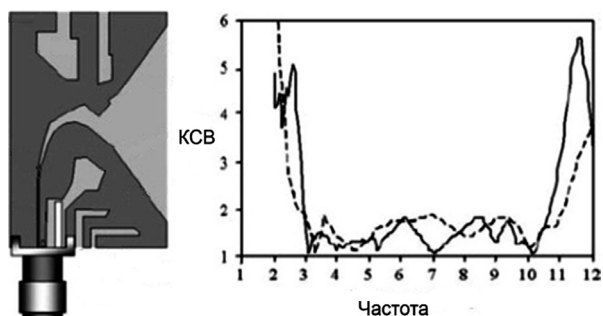


Рис. 28. Топология излучателя с набором шлейфов и щелей (а) и его частотная зависимость КСВ (б)

К рассмотренным антеннам на основе монополя близки антенны с монополем на стороне копланарной линии (лицевой металлизации). Такая антенна в самой простой реализации (рис. 30) есть излучатель-монополь, который окружен земляным проводником.

Копланарная антенна (рис. 30) имеет рабочие частоты 5,12–12,31 ГГц при размерах 120×100 мм, $\epsilon = 4,9$; $h = 0,8$ мм [34].

Излучатель может быть выполнен на стороне, обратной подводящей копланарной линии (рис. 31). В этой структуре разрыв входной копланарной

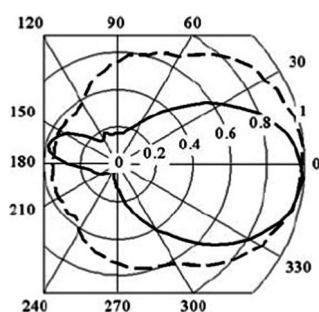


Рис. 29. Диаграмма направленности антенны (рис. 28): непрерывная линия — E -координата, штриховая линия — H -плоскость

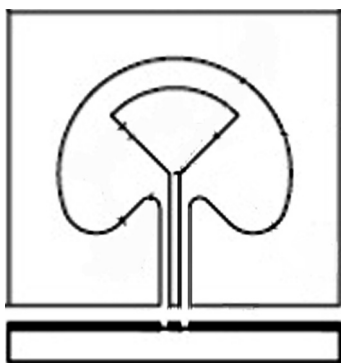


Рис. 15.30. Топология копланарной антенны

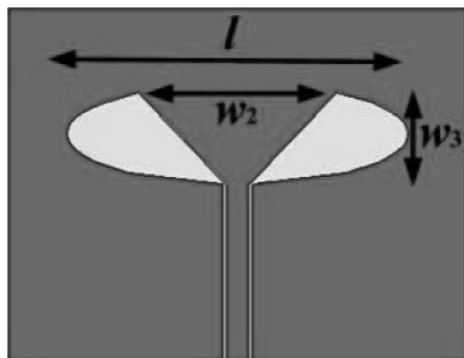


Рис. 32. Антенна с щелевыми вибраторами



Рис. 31. Вид антенны с излучателем на стороне, обратной подводящей линии

линии на обратной стороне металла создает дополнительные резонансы и позволяет получить сравнительно высокий коэффициент усиления антенны (7 дБ на 10 ГГц) при узкополосном согласовании 4% для 10 ГГц [35]. Размеры излучателя $18 \times 10,5$ мм, $\epsilon = 2,17$; $h = 0,508$ мм.

Расширения щелей копланарной линии могут образовывать щелевые вибраторы. Симметричные вибраторы на основе данных щелевых резонаторов представлены на рис. 32 [36]. Получена полоса 7,5–11,3 ГГц. Размеры излучателя 30×12 мм, $\epsilon = 3,38$; $h = 0,508$ мм.

1.5.3. Развитие вибраторных антенн X-диапазона

Подобно оптимизации формы планарного монополя, целесообразна оптимизация топологии планарного балансного диполя (PBD) (рис. 33). Реализация данной структуры показала согласование в полосе 2,9–15,0 ГГц при размерах 45×40 мм [37].

Разрабатываются планарные реализации антенны типа Уда–Яги, с парой диполей и пассивными вибраторами, сужающими главный максимум ДН и тем самым повышаю-

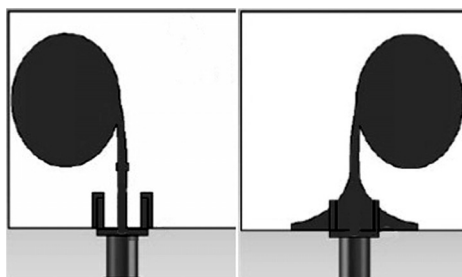


Рис. 33. Вид на лицевой и земляной проводники планарного балансного диполя