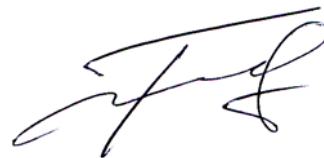


Экз. №

На правах рукописи



БОГДАНОВ ЮРИЙ МИХАЙЛОВИЧ

УДК 621.373.5.029.64

**ИССЛЕДОВАНИЕ И СОЗДАНИЕ ГИБРИДНО – МОНОЛИТНЫХ
СВЧ – ГЕНЕРАТОРОВ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ НА
УНИВЕРСАЛЬНЫХ АКТИВНЫХ GaAs МИС
В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ 1...18 ГГц**

05.27.01 - Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро-наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Фрязино - 2007 г.

Работа выполнена в федеральном государственном унитарном предприятии
«Научно-производственное предприятие «Исток»

Научный руководитель: кандидат технических наук Темнов А.М.

Официальные оппоненты

- доктор технических наук Новоселец Виктор Исидорович

- кандидат технических наук, доцент Геворкян Владимир Мушегович

Ведущая организация – ФГУП «Калужский научно-исследовательский радиотехнический институт», г. Жуков.

Защита состоится 29 мая 2007 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 409.001.01 при ФГУП «НПП «Исток» по адресу: 141190, Московская область, г. Фрязино, Вокзальная, д.2 а, Большой конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП «НПП «Исток»

Автореферат разослан 28 апреля 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук



Э.В.Погорелова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Последние годы характеризуются доминирующим положением полупроводниковых приборов и твердотельных устройств на их основе в технике и приборах СВЧ. Стремление к миниатюризации радиоэлектронной аппаратуры и повышению ее надежности привело к созданию сначала гибридных интегральных схем (ГИС), а в дальнейшем гибридно-монокристаллических (ГМИС) и монокристаллических (МИС) схем СВЧ.

Технология изготовления МИС предъявляет на порядок более высокие требования к точности изготовления элементов, чем технологии ГИС и ГМИС. В тоже время, последняя в значительной степени воспроизводима и автоматизирована, что позволяет сократить затраты времени и средств на проектирование и изготовление изделий, что делает её достаточно перспективной. Важным обстоятельством является более высокая готовность радиоэлектронной промышленности к применению ГМИС, как правило, не требующих для своей работы дополнительных внешних элементов.

В диссертационной работе из всего многообразия твердотельных устройств исследуются СВЧ – генераторы и преобразователи частоты (смесители, преобразователи, делители, умножители). Такое их объединение связано с тем, что СВЧ – генераторы также можно рассматривать как преобразователи сигнала нулевой частоты (постоянного тока питания АЭ) в СВЧ – сигнал. Поэтому, несмотря на различие этих устройств, между ними есть много общего, что позволяет использовать единый подход к их проектированию, созданию и исследованию:

1. Миниатюризация твердотельных устройств привела к необходимости использования в них по – возможности однотипных активных элементов. В настоящий момент такими элементами являются GaAs полевые транзисторы с барьером Шотки (ПТШ), работающие в более широком диапазоне частот, по сравнению с биполярными транзисторами.

2. СВЧ – генераторы и преобразователи частоты можно отнести к классу устройств малой мощности (0,01...0,1 Вт), что упрощает их анализ и исследование. В то же время во всех этих устройствах ПТШ работают в суще-

ственно нелинейных режимах, поэтому для расчетов требуются нелинейные модели ПТШ.

3. Для широкого применения рассматриваемых твердотельных устройств они должны быть выполнены в виде ГМИС, которые помимо активных элементов содержат планарные и миниатюрные навесные пассивные элементы. В верхней части диапазона частот 1...18 ГГц проявляется распределенный характер пассивных элементов, который необходимо учитывать при проектировании и создании ГМИС СВЧ.

4. Использование ограниченного числа унифицированных активных элементов позволяет создавать устройства в различных частях диапазона СВЧ.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ЦЕЛЬ РАБОТЫ. Несмотря на значительное число исследований, посвященных вопросам проектирования, создания и исследования ГМИС СВЧ, к началу работы над диссертацией оставался нерешенным широкий круг задач.

Как уже отмечалось, основными активными элементами ГМИС СВЧ являются ПТШ. К моменту начала работы над диссертацией в СВЧ - устройствах использовались ПТШ с однородными профилями легирования примеси и гомопереходами, что не позволяло в полной мере раскрыть преимущества этих приборов перед биполярными транзисторами и СВЧ – диодами. Расчет параметров таких ПТШ и устройств на их основе требовал более точных моделей, позволяющих получить высокие выходные параметры СВЧ – устройств.

К моменту начала работы над диссертацией имелись многочисленные публикации о методах расчета элементов ГМИС, размещенных на диэлектрической подложке, и практически не были исследованы пассивные элементы, размещенные на GaAs - кристалле, широко применяемые в ГМИС. Моделирование планарных элементов преимущественно выполнялось на основе эквивалентных схем, тогда как для более точного их описания особенно на высоких частотах требуется использовать электродинамические модели.

К моменту начала работы над диссертацией конструктивно ГМИС выполнялись на диэлектрической подложке с навесными дискретными ПТШ, применение которых не позволяло реализовать всех преимуществ данной технологии. Отсутствовал единый подход к разработке унифицированных рядов СВЧ - генераторов и преобразователей частоты в широком диапазоне частот.

Все это сдерживало внедрение элементов монолитной технологии при создании СВЧ – генераторов и преобразователей частоты, которые по этой причине оставались преимущественно гибридно-интегральными.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ состояла в разработке более строгих моделей ПТШ и пассивных элементов, научно обоснованном объединении этих элементов в универсальные активные GaAs МИС и создании на их основе рядов ГМИС генераторов и балансных устройств преобразования частоты (смесителей, преобразователей, делителей, умножителей), работающих в широком диапазоне частот (1...18 ГГц) и реализующих более высокие выходные параметры.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА. В работе получены следующие основные результаты, которые в большинстве своем являются новыми.

1. Предложены оригинальные структуры и выполнены исследования ПТШ с неоднородным (ступенчатым) профилем легирования и на гетероструктурах. Показано, что в таких приборах реализуется низкая модуляционная чувствительность СВЧ - параметров транзисторов к первичным НЧ флуктуациям на поверхности и в объеме канала транзистора [1-4].

2. Предложена конструкция и выполнено теоретическое и экспериментальное исследование характеристик генераторов на ПТШ с неравномерным профилем легирования. Показано, что оптимизация профиля легирования примеси активного слоя позволяет на 6...12 дБ снизить спектральную плотность мощности фазовых шумов генераторов [10-12].

3. Впервые в отечественной и зарубежной практике разработана конструкция генератора на ПТШ, стабилизированного высокотемпературным сверхпроводящим резонатором. На частоте 10 ГГц выходная мощность генератора со-

ставляет 10 мВт, относительная нестабильность частоты $\pm 5 \cdot 10^{-7}$, ослабление второй гармоники относительно основной частоты – 26 дБ [13].

4. Впервые в отечественной практике разработан ряд ГМИС генераторных модулей – 4-х полюсников с отрицательным дифференциальным входным сопротивлением для применения в качестве активных элементов миниатюрных электрически перестраиваемых и стабильных транзисторных генераторов на ПТШ с относительной нестабильностью частоты до 2×10^{-5} и выходной мощностью до 25-50 мВт в диапазоне частот 1...18 ГГц [14-16].

5. Предложена конструкция и выполнено исследование генератора на ПТШ с перестройкой частоты с помощью другого ПТШ [17].

6. Разработана универсальная активная МИС СВЧ – аналоговый перемножитель частот, содержащая балансно - включенные ПТШ и миниатюрные емкости [18].

7. На основе универсальной активной МИС – аналогового перемножителя частот разработан ряд гибридно-монокристаллических интегральных схем СВЧ - преобразователей, смесителей, умножителей и делителей частоты для синтезаторов частот и трактов преобразования частоты приемно – передающих модулей аппаратуры РЭБ, РЛС в диапазоне частот 1...18 ГГц [18-21].

ЦЕННОСТЬ РАБОТЫ состоит в том, что в ней в рамках единой научной задачи рассмотрена методология проектирования ГМИС СВЧ – генераторов и преобразователей частоты, когда полупроводниковые приборы описываются моделями с существенно нелинейными параметрами, и созданы ряды СВЧ - генераторов, смесителей, преобразователей, умножителей и делителей частоты в различных частях СВЧ диапазона унифицированные по габаритно-присоединительным размерам и питающим напряжениям.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ. Основные результаты работы обсуждались на семинарах Московского отделения НТО им. А.С. Попова (Москва, 1978 -81, 1989, 1991, на 16-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» 11-15 сентября 2006 г., Севастополь, Украина.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ ИСПОЛЬЗОВАЛИСЬ в ФГУП «НПП «Исток» и на других предприятиях отрасли. Разработанные по результатам диссертационной работы изделия нашли применение в аппаратуре, выпускаемой предприятиями, представленными в табл. 1.

Таблица 1

Наименование ОКР и НИР по тематике диссертационной работы	Предприятия – разработчики аппаратуры
1. Облик 2. Орден 3. Овод 4. Отвод 5. Синтетика 6. Репей-ПРБ 7. Созвездие-4 8. Отвага-4Г 9. Отвага-4У 10. Прогресс-2004 11. Синтетика-2005	1. ОАО МНИИРЭ г. Москва, 2. ОАО «НПО Алмаз» г. Москва, 3. НИИ «Стрела» г. Тула, 4. МНИИ «Агат» г. Жуковский, 5. ОАО НИИРТ г. Нижний Новгород, 6. СКБ «Система» ХК «Ленинец», г. С-Петербург, 7. ОАО «НИЭМИ» г. Москва, 8. ОАО КБ «ЛУЧ» г. Рыбинск, 9. ФГУП «КНИРТИ» г. Жуков, 10. ФГУП «ЦНИРТИ» г. Москва, 11. ПКП БИСТ г. Чистополь, 12. ФГУП «КБ «Квазар» г. Нижний Новгород, 13. ОАО «КБ «Лианозовские радары» г. Москва, 14. ФГУП «ЦКБА», г. Омск, 15. ФГУП «НИИЭП», 16. ФГУП «РНИИ КП», 17. НПЦ ЗАО «АЛМАЗ - ФАЗОТРОН», г. Саратов, 18. ОАО «ОКТАВА», г. Новосибирск, 19. ФГУП ЦНИИ «КОМЕТА» г. Санкт – Петербург, 20. ОАО «ГРАНИТ» г. Санкт – Петербург, 21. ОАО «РАТЕП» г. Серпухов, 22. ОАО Ставропольский радиозавод «Сигнал» 23. ФГУП «НИИ ВЕКТОР» г. Санкт Петербург, 24. ФГУП «Курский НИИ МО РФ»

В 10 НИОКР автор являлся главным конструктором разработки. Все изделия, разработанные в результате выполнения ОКР, выпускаются сериями от 100 до 2000 шт. в год подразделениями ФГУП «НПП «Исток».

ПУБЛИКАЦИИ. В основу диссертации положены работы, опубликованные в 11 статьях, 3 патентах РФ, одном авторском свидетельстве.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Список цитируемой литературы содержит 80 наименований, в том числе в 22-х автор диссертации выступает в роли автора.

В результате выполнения работы получен ряд новых результатов, основные из которых сформулированы в виде следующих

НАУЧНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ, ВЫНОСИМЫХ НА ЗАЩИТУ:

1. Неоднородный профиль легирования активного слоя структуры GaAs ПТШ, включающий тонкий слой с повышенной концентрацией на границе с буферным слоем, существенно уменьшает зависимость емкостей затвор-исток, затвор-сток и крутизны ПТШ от первичных НЧ флуктуаций зарядовых состояний на поверхности и в объеме канала и тем самым позволяет на 6...12 дБ снизить спектральную плотность мощности фазовых шумов генераторов, созданных на основе таких ПТШ (патент РФ № 2093925).
2. 4-х полюсные ГМИС на основе ПТШ с неоднородным профилем легирования с нормированным отрицательным дифференциальным входным сопротивлением в 50-омном тракте в заданном диапазоне частот и 50-омным выходом, могут служить универсальными активными элементами малошумящих генераторов СВЧ, при этом генерация происходит на резонансной частоте внешней колебательной системы, подключаемой к входу ГМИС. Применение таких ГМИС существенно упрощает и удешевляет разработку и производство малошумящих ГУН и генераторов, стабилизированных ДР (патент РФ № 2012102).
3. МИС на структуре GaAs, состоящая из двух идентичных ПТШ, соединенных стоками и имеющих перекрестное соединение затворов и истоков через разделительные емкости, и третьего ПТШ, затвор которого через разделительную емкость соединен со стоками пары ПТШ, а сток через разделительную емкость и воздушный мост соединен с затвором одного из парных ПТШ, в зависимости от конфигурации внешней подключенной к МИС схемы, выполняет одну из функций: делителя частоты на 2, балансного умножителя частоты на 2, двойного балансного смесителя, преобразователя частоты, в диапазоне частот 1...18 ГГц. При этом длина затвора всех ПТШ должна быть не более 0,5 мкм.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во ВВЕДЕНИИ проводится аналитический обзор литературы, обосновывается выбранное направление работы, ставятся задачи исследования, обсуждаются содержание и структура диссертации.

ГЛАВА 1. РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ АКТИВНЫХ И ПАССИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

ГМИС СВЧ являются не только переходным этапом между ГИС и МИС СВЧ, их можно рассматривать как самостоятельный класс интегральных приборов. В качестве активных приборов в ГМИС СВЧ широко используются ПТШ, а пассивные элементы миниатюризированы, изготовлены по единой тонкопленочной технологии на изолирующей подложке из сапфира, поликора или GaAs. Важным этапом в процессе создания ГМИС является этап проектирования. Для эффективного его выполнения необходимы точные модели входящих элементов.

1.2. Моделирование ПТШ

1.2.1. ПТШ с низкой модуляционной чувствительностью.

Широкому применению ПТШ в целом ряде устройств, например в автогенераторах, препятствует высокая интенсивность низкочастотных (НЧ) флуктуации в канале и на поверхности ПТШ. В работах [1,3,4] рассматривается возможность оптимизации активного слоя ПТШ, снижающая влияние первичных флуктуаций на модуляционный шум автогенераторов.

Основным фактором, вызывающим модуляции частоты или фазы в СВЧ - устройствах на ПТШ, является флуктуация входной емкости транзистора $C_{из}$. В рабочем режиме спектральную плотность мощности флуктуации частоты генератора на ПТШ на расстоянии по частоте ν от несущей частоты f_0 можно представить в виде: $S_{\omega}(f_0 \pm \nu) = K(f_0, \nu) S_c(\nu)$, где $S_c(\nu)$ – спектральная плотность флуктуации входной емкости ПТШ на низкой частоте ν ; $K(f_0, \nu)$ – коэффициент преобразования НЧ - колебаний в колебания СВЧ, который можно считать пропорциональным произ-

водной входной емкости по напряжению на затворе $K(f_0, \nu) = K_c = 1 / C_{из}$ ($dC_{из}/dU_{из}$). Отсюда следует, что для уменьшения коэффициента преобразования K_c необходимо минимизировать зависимость входной емкости транзистора от разности потенциалов $U_{зи}$. Формула для удельной входной емкости ПТШ имеет вид $C_{из} = \varepsilon \int_{x_i}^{x_c} dx / h(x)$, где ε - диэлектрическая проницаемость полупроводника; x - координата в направлении вдоль канала от электрода истока; x_i, x_c - границы обедненного слоя со стороны истока и стока; $h(x)$ - толщина обедненного слоя под затвором в сечении x . В приближении плавного, бесконечного по оси z канала, толщина $h(x)$ связана с разностью потенциалов V между истоком и каналом функциональным соотношением $V = \varepsilon^{-1} \int_0^{h(x)} y \rho(x, y) dy$, справедливом при произвольном

распределении плотности заряда в обедненном слое $\rho(x, y)$. Разность потенциалов V является суммой приложенной разности потенциалов $U_{из}$, встроенного потенциала $\varphi_б$ и локального значения потенциала в сечении x проводящего канала $V_K(x)$ («текущего потенциала») $V = U_{из} + \varphi_б + V_K(x)$. Из этих трех слагаемых только текущий потенциал зависит от флуктуации в полупроводниковой структуре транзистора. Каков бы ни был механизм этих флуктуации все они вызывают флуктуации текущего потенциала $\delta V_K(x, t)$ и, следовательно, флуктуации разности потенциалов δV .

Флуктуации $\delta V_K(x)$ вызывают локальные флуктуации толщины обедненного слоя $\delta h(x) = \varepsilon \delta V_K(x) / \{h(x) \rho[h(x)]\}$ и емкости $\delta C_{из}$.

В работе показано, что слабая зависимость $C_{из}(U_{из})$ свидетельствует о малости влияния первичных флуктуации на величину флуктуации входной емкости ПТШ, а при снижении ($dC_{из}/dU_{из}$) уменьшаются как интенсивность НЧ - флуктуаций емкости, так и величина коэффициента их преобразования в СВЧ - диапазон. Флуктуации входной емкости и ее нелинейность зависят от профиля легирования рабочего слоя ПТШ, поэтому при рациональном выборе этого профиля шумовые характеристики СВЧ - уст-

ройств заметно улучшаются. Профиль легирования влияет также на другие элементы эквивалентной схемы ПТШ: крутизну g_m , которая в значительной мере определяется теми же параметрами $h(x)$ и $\rho(h)$.

Для получения транзистора с постоянными крутизной и входной емкостью необходимо обеспечить неоднородный профиль легирования с малой концентрацией легирующей примеси в слое под затвором и высокой концентрацией примеси в слое у буфера. Если в обычном ПТШ величины $C_{из}$ и g_m заметно изменяются с ростом $U_{из}$, то в ПТШ со специальным профилем существуют широкие диапазоны изменения напряжения на затворе, при которых величины $C_{из}$ и g_m остаются постоянными. Для оценки чувствительности структур к первичным флуктуациям рассчитывался отклик $\delta C_{из}$ на возмущения концентрации δV_D и подвижности $\delta \mu$, задаваемые в каналах рассматриваемых ПТШ на участках длиной Δx . При одинаковых относительных изменениях концентрации доноров и подвижности электронов, отклик $\delta C_{из}$ в ПТШ со специальным профилем легирования изменяется в значительно меньшей степени, чем в обычном транзисторе. В работе [2] предложена структура ПТШ с низкой чувствительностью модуляционных характеристик, выполненная в виде гетероструктуры.

1.2.2. Методика расчета параметров нелинейной модели ПТШ

Процесс восстановления (расчета) параметров нелинейной модели ПТШ включает в себя ряд расчетно-экспериментальных этапов [5-8].

1. На анализаторе цепей проводились измерения малосигнальных S - параметров ПТШ в диапазоне 0,05...18 ГГц.
2. Для восстановления параметров эквивалентные схемы представлялись в виде T-образного соединения комплексных сопротивлений Z_1, Z_2, Z_3 , которые связаны с измеренными S-параметрами.
3. Расчеты показали, что R_i слабо изменяются с частотой, а $X_j(f) = \omega L_j - 1/(\omega C_j)$. Найти усредненные значения L_j и C_j можно с помощью метода наименьших квадратов.

4. По полученным параметрам линейной модели ПТШ определяем параметры нелинейной модель ПТШ.

1.2.3. Модели ПТШ при различных ширинах затвора

Считается, что емкости ПТШ изменяются линейно, а сопротивления - обратно пропорционально с ростом ширины затвора. Для выяснения реальной зависимости параметров ПТШ от ширины затвора были изготовлены топологии ПТШ с различной шириной затвора на одной подложке GaAs. Для каждой топологии были измерены S-параметры и выполнено восстановление параметров схемы ПТШ. Зависимости рассчитанных емкостей от ширины затвора, приведенные в табл. 2, показывают, что они являются нелинейными функциями в области малых ширин канала.

Таблица 2

Ширина затвора W, мкм	C10, пФ	CF0, пФ	RS, Ом	RD, Ом
20	0.054	0.044	4	11
37	0.07	0.055	7	4
75	0.085	0.077	5.4	4
150	0.12	0.13	3	3
300	0.21	0.21	1.5	1.5
450	0.315	0.315	1	1
600	0.4	0.37	0.75	0.75

1.3. Моделирование пассивных элементов

1.3.1. Моделирование миниатюрных сосредоточенных конденсаторов

В работе предложен метод моделированию сосредоточенных конденсаторов. Одну обкладку конденсатора припаивают к поверхности микрополосковой линии, а вторую обкладку соединяют проводником с другим проводником линии. Проводят измерения малосигнальных S-параметров системы в интервале частот 0,5...18 ГГц. Такую систему представляют в виде П-образного соединения комплексных импедансов: последовательного Z_1 и двух параллельных Z_2 . Импедансы Z_1 , Z_2 связаны с S-параметрами формулами, аналогичными приведенным выше.

1.3.2. Расчет планарных спиральных индуктивностей

В диапазоне СВЧ планарные индуктивности обычно реализуются в виде микрополосковых линий, свернутых в спираль или меандр.

Для моделирования были выполнены индуктивности в форме квадратных спиралей на полупроводниковой подложке толщиной 100 мкм. Ширина полоска $W = 10$ мкм и зазор $S = 5$ мкм. Один конец катушки подсоединялся непосредственно, а другой через воздушный мостик высотой $t = 2$ мкм и шириной $W_1 = 15$ мкм. Спирали моделировались с помощью эквивалентных схем и проводился расчет реальной топологии катушки путем решения полевой задачи по программе электромагнитного моделирования. Рассматривались последовательное и параллельное соединение спиралей.

Измерялись зависимости от частоты S_{11} и S_{21} . Затем разрабатывалась структура эквивалентной схемы спирали, содержащая L – индуктивность спирали; R_1 – сопротивление потерь в проводниках спирали; C_1 и C_2 – параллельные емкости, C_3 – емкость между витками спирали. Выполнялась оптимизация с целью максимального приближения измеренных и рассчитанных S – параметров. Результаты расчета приведены в табл. 3.

Таблица 3

N (число витков)	L (нГн)	C_1 (пФ)	C_2 (пФ)	C_3 (пФ)	R_1 (Ом)
2.5	0.595	0.033	0.027	0	1.766
3.5	1.234	0.045	0.035	0.005	2.95
4.5	2.475	0.072	0.053	0.008	3.246
6.5	8.969	0.131	0.089	0	13.587

1.3.3. Расчет планарных меандровых индуктивностей

Проводилось измерение S - параметров в диапазоне частот 0,5...18 ГГц и определение элементов эквивалентной схемы для изготовленной матрицы меандров. По измеренным S - параметрам была составлена эквивалентная схема меандровой индуктивности из П-образных CLR-звеньев. Величины полученных элементов эквивалентной схемы для матрицы меандровых индуктивностей приведены в табл.4.

Таблица 4

Ширина – W(мкм) Зазор – S (мкм)	L_1 (нГн)	C_1 (пФ)	C_2 (пФ)	R_1 (Ом)	R(Ом)
W=10(9.3) S=10(10.3)	0.679	0.054	0.080	3.47	6.0
W=10(9.3) S=20(20.6)	0.711	0.064	0.075	3.68	6.2
W=10(9.4) S=30(30.8)	0.805	0.027	0.094	4.01	6.8
W=20 S=20	0.575	0.053	0.107	1.98	3.3
W=20 S=40	0.624	0.079	0.108	1.78	2.8
W=20 S=60	0.674	0.127	0.103	2.08	3.2

Примечание: R - сопротивление измеряемого образца на постоянном токе.

1.4. Универсальная активная МИС – аналоговый балансный перемножитель частот (АБПЧ) на ПТШ.

Гибридно-монокристаллические схемы таких устройств средней мощности, как преобразователи частоты и смесители, базируются на балансном включении активных элементов. С целью реализации большого числа устройств преобразующих спектр сигналов СВЧ на основе ограниченного числа МИС, в работе была предложена и разработана универсальная GaAs МИС с балансным включением ПТШ, выполняющая функцию аналогового балансного перемножителя частот.

Микросхема изготовлена на кристалле арсенида галлия и содержит три полевых транзистора и четыре микроконденсатора с номиналами 0,4 пФ и 2,5 пФ. В качестве базовой технологии при разработке МИС использована технология монокристаллических интегральных схем на арсениде галлия на основе ПТШ с длиной затвора 0,25 мкм. Микросхема имеет восемь выводов для подачи на транзисторы напряжений смещения, ввода и вывода СВЧ сигналов. Поскольку все транзисторы выполнены на едином кристалле и по единой технологии, то соответствующие параметры транзисторов отличаются незначительно, что является необходимым условием работы балансной схемы. Преимуществом разработанной схемы является высокая развязка между СВЧ – входами и выходами. Используя различные варианты включения МИС, как показано ниже, можно реализовать 4 типа гибридно-

монолитных схем СВЧ: делителя частоты, балансного умножителя частоты, двойного балансного смесителя, балансного преобразователя частоты.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРОВ СВЧ

2.1. Особенности создания генераторов СВЧ на ПТШ

1. ПТШ в генераторах СВЧ работают в режимах, когда их параметры являются существенно нелинейными функциями напряжений. Поэтому для проектирования таких устройств необходимо использовать строгие нелинейные модели приборов.

2. Методы проектирования генераторов СВЧ должны разумно сочетать этапы расчета устройств в частотной и временной областях. Поскольку в генераторах возникают существенно негармонические колебания токов и напряжений, то их расчет следует проводить во временной области с учетом переходных процессов. В то же время малосигнальный (частотный) анализ может использоваться для определения области, в которой лежит частота генерации.

3. При разработке и проектировании генераторов СВЧ используется широкий класс измерительной аппаратуры (анализаторы цепей, анализаторы спектра, измерители частоты и мощности, измерители ВАХ и т.п.).

4. Большое разнообразие областей применения генераторов СВЧ предполагает использование различных схемных и конструктивных решений и нетрадиционных материалов для улучшения их выходных параметров.

2.2. Проектирование автогенератора на ПТШ стабилизированного диэлектрическим резонатором

Диэлектрический резонатор (ДР) связанный с микрополосковой линией (МПЛ), имеющей волновое сопротивление Z_0 , описывается эквивалентным сопротивлением $Z_R = Z_0 k / [1 + j Q_R (f/f_R - f_R/f)]$, где Q_R и f_R - добротность и собственная частота резонатора; k - коэффициент связи ДР с МПЛ.

Расчет энергетических характеристик генераторов на ПТШ основывается на следующей методике. Для выбранного типа транзистора и схемы генератора рассчитывается полное сопротивление на клеммах нагрузки $Z_{BX}(f)$

при малом сигнале. Вариацией значения индуктивности параметров схемы достигаются условия $X_{BX}(f_0) = 0$ при $R_{BX}(f_0) < 0$ задается величина сопротивления нагрузки R_H и рассчитывается процесс установления колебаний, период T_0 и частота f_0 этих колебаний, а также мощность P_H и КПД на основной частоте и ее гармониках. Расчетные зависимости мощности P_H , КПД и частоты f_0 от напряжений питания ПТШ (E_3 , E_c) и R_H показали, что при значениях E_3 , близких к напряжению отсечки, величина постоянной составляющей тока в нагрузке уменьшается, что приводит к увеличению КПД. Повышение мощности P_H связано с увеличением размаха колебательного цикла. Предельное значение E_c определяется величиной напряжения пробоя. При этом оптимальные значения E_3 и E_c для максимума мощности и максимума КПД не совпадают.

2.3. Генератор, стабилизированный ВТСП – резонатором

В работе применялись резонаторы, выполненные из монокристаллов висмутовой системы. Такие монокристаллы получают путем скалывания ультразвуком тонких слоев (толщиной 80 – 100 мкм) вдоль кристаллической решетки от объемного образца ВТСП – монокристалла. Поверхность скола не требует дополнительной шлифовки.

Существенные отличия разработанной схемы генератора от схем, созданных ранее, связаны с переходом на питание транзистора от одного источника питания. Напряжение этого источника питания приложено между стоком и корпусом. На затвор напряжение подается через резистивный делитель. Связь с нагрузкой осуществляется в стоковой цепи через конденсатор. Микросхема генератора выполнена с помощью фотолитографии на поликремневой подложке с размерами 0.5x6x7.5 мм. Плата припаивается припоем ПОС-61 к медному позолоченному основанию. Основание с платой с помощью винтов крепится к корпусу модуля. Кристаллы схемы генератора крепятся на специальной металлизированной площадке платы генератора с помощью пайки золото - кремниевым эвтектическим припоем при температуре 450°C. Параметры образцов приведены в табл. 5.

Таблица 5

f , ГГц	P , мВт	Уровень второй гармоники, дБ	Спектральные составляющие в полосе $\pm 10\%$	$U_{\text{пит}}$, В	I , мА	γ_{ϕ} , дБ/Гц, на $F=5$ ГГц	$\Delta f / f$ за 1 час
14,173	>100	-26	Отсутствует на уровне -80 дБ	9	50	-60	$\pm 5 \cdot 10^{-7}$
14,253	>100	-26	То же	9	48	-60	-
14,168	>100	-28	То же	9	47	-55	-

2.4. Генератор на ПТШ с низкими фазовыми шумами

На основе полевого транзистора с барьером Шотки, предложенного в [1], был разработан СВЧ - генератор.

В работе определялась разница в уровнях фазовых шумов генератора при использовании в качестве активного элемента ПТШ с однородным или специальным профилями легирования активного слоя. Характеристики последнего соответствовали расчетам. Эксперименты проводились на ПТШ с шириной и длиной затвора 300 и 0,7 мкм соответственно. Использовался генератор на ДР, в котором не принимались дополнительные меры по снижению фазового шума. Стабилизирующий резонатор был включен в цепь затвора ПТШ. Величина нагруженной добротности ДР составляла $Q_n \sim 1500$. Полученные результаты свидетельствуют о существенном снижении СПМ фазовых шумов при использовании ПТШ со специальным профилем легирования. Величина снижения составляет 6...12 дБ в зависимости от индивидуальных свойств транзистора. Применение ПТШ с низкой модуляционной чувствительностью позволяет существенно снизить уровень ФМ - шумов не только узкополосных генераторов, в которых это может быть осуществлено с помощью схемных методов (например, фазовой или частотной автоподстройки), но и в генераторах, работающих в широком диапазоне частот, в которых схемные методы практически неприменимы.

2.5. Генераторы, управляемые напряжением

Важнейшим параметром ГУН является диапазон перестройки частоты, ширина которого зависит, как от типа активного (генераторного) элемента, так и от типа управляющего элемента. В подавляющем большинстве конструкций ГУН в качестве управляющего элемента используется варактор.

В работе предложена универсальная схема генератора, для которой были проведены исследования зависимости от частоты модуля коэффициента отражения $\Gamma(f)$ генераторного модуля в плоскости включения нагрузки для различных частей рассматриваемого диапазона частот. Кривые $\Gamma(f)$ позволяют делать вывод о реализации в схеме генератора режима генерации, поскольку величина $\Gamma(f)$ больше 1 только в том случае, когда активная составляющая полного сопротивления генераторной цепи отрицательна.

Проведенные расчеты и теоретические исследования позволили разработать ряд высоконадежных, малогабаритных и относительно недорогих ГУН для широкого диапазона частот, а также универсальных генераторных модулей – 4-х полюсников с отрицательным дифференциальным входным сопротивлением. Генераторный СВЧ-модуль представляет собой транзисторный генератор СВЧ и СВЧ – усилитель, включенный на выходе генератора. Особенностью генераторных модулей является наличие у них входа для подключения внешней частото задающей колебательной системы. Последнее обстоятельство делает их универсальными элементами генераторов различного назначения, в частности ГУН и генераторов, стабилизированных высокочастотными резонаторами.

В качестве активного элемента был выбран ПТШ с шириной затвора 300 мкм. Схема содержит внешние по отношению к ПТШ элементы обратной связи по току. Генераторный модуль предназначен для работы на нагрузку 50 Ом с КСВН не более 2.

ГЛАВА 3. УМНОЖИТЕЛИ И ДЕЛИТЕЛИ ЧАСТОТЫ НА ПТШ

3.1. Делитель частоты на основе схемы Миллера (ДЧ)

В 1939 г. Миллер предложил схему аналогового делителя частоты. На гетеродинный вход смесителя поступают колебания с частотой f . Компонента белого шума в цепи сигнального входа смесителя с частотой $f/2$ преобразуется после взаимодействия с сигналом гетеродина в сигнал с частотой $f - f/2 = f/2$. Сигнал с выхода смесителя проходит ППФ, усиливается и часть полученной мощности опять поступает на сигнальный вход смесителя. Происходит регенерация компоненты с частотой $f/2$ при условии: $K_{см} K_{ус} K_{дм} > 1$, $\varphi_{\Sigma} = 2 \pi n$, где $K_{см}$ - коэффициент передачи смесителя; $K_{ус}$ - коэффициент передачи усилителя; $K_{дм}$ - коэффициент передачи делителя мощности в цепи обратной связи; φ_{Σ} - суммарный набег фаз в контуре, $n = 1, 2, \dots$

В работе предложена и реализована оригинальная схема смесителя для ДЧ. Впервые созданы смесители на основе ПТШ для работы в составе ДЧ в коротковолновой части сантиметрового диапазона длин волн. Схема смесителя содержит только два ПТШ. В данной схеме каждый из двух транзисторов совмещает функции смесителя и инвертирующего каскада, благодаря чему сокращается число транзисторов и расширяется верхняя граница диапазона рабочих частот ДЧ. Последнее обстоятельство связано с уменьшением крутизны сквозной ФЧХ делителя из-за уменьшения числа последовательно включенных каскадов.

В диссертации были разработаны и исследованы смесители по данной схеме в диапазоне частот 1...12 ГГц. Экспериментальные исследования проводились при работе смесителя на нагрузку 50 Ом на различных частотах гетеродина. При этом частота сигнала приблизительно равнялась $f_r/2 \pm 0,05$ ГГц, где f_r - частота гетеродина.

Основные параметры смесителей:

Диапазон рабочих частот.....1...12 ГГц;
Мощность гетеродина..... >5 мВт;
Потери преобразованияне более 3 дБ;

Развязка цепи ПЧ относительно входов

гетеродина и сигнала в диапазоне частот не хуже 10...20 дБ;

КСВН входов $< 2,5$;

Фазовый сдвиг колебаний ПЧ

относительно сигнала 180 ± 10 град.

Задача усилительного каскада заключается в компенсации потерь в пассивных цепях ДЧ, смесителе и обеспечении заданной ФЧХ. В данной работе применен однокаскадный усилитель на ПТШ по схеме с общим истоком.

Сочетание простого усилительного каскада с эффективным двойным балансным смесителем, содержащим небольшое число элементов, позволило создать делитель частоты с верхней границей диапазона рабочих частот 12 ГГц. Все активные элементы схемы и 4 тонкопленочных конденсатора реализованы в виде универсальной МИС аналогового балансного перемножителя частоты (АБПЧ).

3.2. Экспериментальные результаты

В процессе выполнения работы были изготовлены образцы литерных делителей частоты на 2 в диапазоне частот 1...12 ГГц по входу. Из полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Существует ярко выраженная зависимость между уровнем входной мощности и диапазоном рабочих частот ДЧ.
2. С точки зрения потребительских свойств ДЧ существенно наличие большого интервала разрешенных входных мощностей прибора. При изменении входной мощности на 10 дБ работоспособность ДЧ сохраняется, а выходная мощность изменяется менее чем на 3 дБ.
3. Оптимальная входная мощность ДЧ 5...30 мВт.

3.3. Умножители частоты на основе универсальной активной МИС

Как показано в работе, при размыкании цепи обратной связи в МИС АБПЧ и при изменении конфигурации внешней цепи, МИС АБПЧ может выполнять функцию балансного умножителя частоты.

В отличие от умножителей частоты на одиночных дискретных ПТШ, которые имеют неудовлетворительные спектральные характеристики и по

этой причине требует применения сложных фильтров в аппаратуре, балансный умножитель на МИС АБПЧ обеспечивает подавление паразитных составляющих спектра на величину не менее 25 дБ в диапазоне частот по выходу 2...12 ГГц и 15 дБ в диапазоне 12...18 ГГц.

ГЛАВА 4. БАЛАНСНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ И СМЕСИТЕЛИ НА ПТШ НА ОСНОВЕ МИС АБПЧ

По шумовым параметрам смесители на ПТШ уступают диодным, однако в них возможно усиление (3...5 дБ), что позволяет снизить требования к коэффициенту шума усилителя ПЧ и расширить динамический диапазон на 10...15 дБ. Важнейшим элементом балансного смесителя является парафазный делитель мощности. Переход на технологию МИС позволил создать парафазные делители мощности на основе элементов с сосредоточенными параметрами.

В настоящей работе предложена и реализована схема смесителя на основе универсальной МИС АБПЧ на GaAs, которая является усовершенствованным вариантом аналогового перемножителя.

В диссертации были разработаны и исследованы смесители в диапазоне частот 1...15 ГГц.

ВЫВОДЫ

1. Предложены и физически обоснованы структуры ПТШ с низкой модуляционной чувствительностью элементов эквивалентной СВЧ схемы к первичным НЧ флуктуациям в объеме и на границе канала ПТШ.
2. Представлены результаты экспериментального и теоретического исследования характеристик планарных катушек индуктивности выполненных в виде квадратной спирали.
3. Приведены результаты измерений меандровых индуктивных элементов. На основании измерений составлена эквивалентная схема индуктивностей.
4. Разработана многофункциональная активная МИС с балансным включением ПТШ, размещенная на кристалле арсенида галлия и содержащая три полевых транзистора и четыре микроконденсатора.
5. Описана методика проектирования автогенераторов на ПТШ и рассмотрен пример ее применения для расчета генератора с ДР .
6. Впервые разработан активный генераторный модуль на ПТШ для работы в составе ГИС генератора со стабилизацией частоты с помощью резонатора из ВТСР.
7. Предложена конструкция генератора на ПТШ со специальным профилем легирования. Показано, что использование такого ПТШ приводит к снижению СПМШ на 6...12 дБ по сравнению с ПТШ с однородным профилем.
8. Впервые в РФ разработаны промышленные конструкции делителей частоты на 2 с верхней границей диапазона рабочих частот 12 ГГц.
9. Впервые в РФ разработан ряд промышленных балансных умножителей частоты на 2 на базе универсальной МИС АБПЧ в диапазоне частот по выходу 2...18 ГГц.
10. Разработанные изделия образуют функционально-полный ряд компонентов для создания синтезаторов частот и приемно-передающих трактов СВЧ аппаратуры:

1) Генераторные модули

Тип прибора, шифр	Диапазон частот, ГГц	P _{вых.} , мВт	Вносимые фазовые шумы на частоте анализа 10 кГц, дБ/Гц	Питание	
				U, В	I, мА
M411154-1	4,5 ... 12,0	25	- 125	9	50
M411154-2	4,5 ... 12,0	25	- 140	9	50
M411154-3	4,5 ... 12,0	50	- 125	9	80
M411154-4	4,5 ... 12,0	50	- 140	9	80

2) Делители частоты на 2

Тип прибора	Диапазон входных частот, ГГц	P _{вх.} , мВт	P _{вых.} , мВт*	Питание	
				U, В	I, мА (max)
M43304-1	1 ... 2	5÷20	2 ÷ 8	5±5%	45
M43304-2	1,5 ... 3	5÷20	2 ÷ 8	5±5%	45
M43304-3	2 ... 4	5÷20	2 ÷ 8	5±5%	45
M43304-4	3 ... 5	5÷20	2 ÷ 8	5±5%	45
M43304-5	4 ... 6	5÷20	2 ÷ 8	5±5%	45
M43304-6	5 ... 7	5÷20	2 ÷ 8	5±5%	45
M43304-7	6 ... 8	5÷20	2 ÷ 8	5±5%	45
M43304-8	7 ... 9	5÷20	2 ÷ 8	5±5%	45
M43304-9	8 ... 10	10÷30	2 ÷ 8	5±5%	45
M43304-11	9 ... 11	10÷30	2 ÷ 8	5±5%	45
M43304-2	10 ... 12	10÷30	2 ÷ 8	5±5%	45

3) Балансные умножители частоты на 2

Тип прибора	F _{вх.} , ГГц	Входная мощность, мВт	Коэффициент передачи при минимальной входной мощности, не менее дБ	Уровень мощности 1 и 3-й гармоник входной частоты на выходе, не более, дБ	U, В	I, мА (max)
M43108-1	1-2	7,5-20	+3	-25	9±5%	60
M43108-2	2-4	20-50	+2	-25	9±5%	60
M43108-3	4-4,5	20-60	0	-25	9±5%	60
M43108-4	4,5-5	20-60	-1	-25	9±5%	60
M43108-5	5-5,5	20-60	-2	-25	9±5%	60
M43108-6	5,5-6	20-60	-3	-25	9±5%	60
M43108-7	6-7,5	20-80	-4	-15	9±5%	40
M43108-8	7,5-9	20-80	-7	-15	9±5%	40

4) Балансные преобразователи частоты

Тип прибора	Диапазон частот гетеродина (F _г), ГГц	Диапазон частот сигнала (F _с), ГГц	Диапазон частот по выходу (F _{вых}), ГГц	P _г , мВт	P _с , мВт	Кп, дБ	Развязка сигнал-выход, дБ	Питание	
								U, В	I, мА
M43227-1	0,2 ... 2	2 ... 12	F _с +F _г или F _с -F _г	7-15	≤ 5	≥ -3	≥ 15	9	50
M43227-2	0,0125 ... 0,4	2 ... 12	F _с +F _г или F _с -F _г	7-15	≤ 5	≥ -3	≥ 15	9	50
M43227-3	0,2 ... 2	12 ... 14	F _с +F _г или F _с -F _г	7-15	≤ 5	≥ -9	≥ 20	9	50
M43227-4	0,0125 ... 0,4	12 ... 14	F _с +F _г или F _с -F _г	7-15	≤ 5	≥ -9	≥ 20	9	50

5) Смесители двойные балансные

Тип прибора	Диапазон частот гетеродина, ГГц	Диапазон частот сигнала, ГГц	Диапазон ПЧ, ГГц	Коэффициент шума, дБ	P _г , мВт	P _с , мВт	Кп, дБ	Развязка сигнал-выход, дБ	Питание	
									U, В	I, мА
M43226-1	2...12	2 ... 12	0,01-2,0	≤ 13	7-15	≤ 5	≥ -3	≥ 15	±5	110
M43226-2	12...14	12 ... 14	0,01-1	≤ 13	7-15	≤ 5	≥ -3	≥ 15	±5	110
M43226-3	14...15	14 ... 15	0,01-1	≤ 10	7-15	≤ 5	≥ -9	≥ 20	±5	50

Таким образом, впервые в стране поставлена и решена задача по созданию научных основ, разработке и организации производства функционально полного набора ГМИС СВЧ для генерации и преобразования спектра сигналов и взаимная увязка всех изделий по входным и выходным параметрам, присоединительным размерам и номиналам источников питания.

Полученные результаты являются основой для проведения работ по созданию нового поколения МИС СВЧ.

По теме диссертации опубликованы следующие основные работы:

1. Богданов Ю.М., Пашковский А.Б., Тагер А.С. и др. Полевой транзистор // Патент РФ № 2.093.925. Приоритет от 10.03.1993.
2. Богданов Ю.М., Пашковский А.Б., Тагер А.С. Полевой транзистор на гетероструктурах. // Патент РФ № 2.093.924. Приоритет от 10.03.1993.
3. Богданов Ю.М., Пашковский А.Б., Тагер А.С. Полевой транзистор с низкой модуляционной чувствительностью для малошумящих СВЧ - устройств.// Радиотехника и электроника. - 1993. - № 2. - С. 346-355.
4. Богданов Ю.М., Балыко А.К., Пашковский А.Б. и др. Полевой транзистор с низкой чувствительностью для малошумящих СВЧ - генераторов.// Электронная техника. Сер.1, СВЧ - техника. - 1993. - Вып.3. - С. 14-19.
5. Балыко А.К., Богданов Ю.М., Васильев В.И. Проектирование монолитного двухканального переключателя СВЧ/ Радиотехника.-2004.-№ 2. - С. 40.
6. Абакумова Н.В., Богданов Ю.М., Балыко А.К. и др. Проектирование многозарядных монолитных аттенюаторов / Электронная техника. Сер.1, СВЧ - техника. 2005. – Вып.2. – С. 6-20.
7. Абакумова Н.В., Балыко А.К., Богданов Ю.М. и др. Одно – и много разрядные схемы аттенюаторов на полевых транзисторах с барьером Шоттки// Радиотехника. - 2007. - № 4. – С. 61-65.
8. Ю.М. Богданов, В.Г. Лапин, А.М. Темнов и др. Монолитный двухканальный переключатель СВЧ с низким КСВН в каналах/ // Электронная техника. Сер.1, СВЧ - техника. - 2007.- Вып. 1. - С. 47 - 50.
9. Алексейчик Л.В., Антоненко А.И., Богданов Ю.М. и др. Генератор СВЧ // А.с. СССР № 1764133/93. Приоритет от 26.10.1989.
10. Богданов Ю.М., Балыко А.К., Пашковский А.Б. и др. Генератор СВЧ на полевом транзисторе. // Патент РФ № 2.012.102. – Приоритет от 30.05.91 г.
11. Балыко А.К., Богданов Ю.М., Козлов Г.П. и др. Расчет энергетических и диапазонных характеристик автогенераторов на ПТШ // Электронная техника. Сер. 1, СВЧ - техника. - 1992. - Вып.6. - С. 14-20.

12. Bogdanov Y.M., Gusev A.P., Tager A.S. and all. A microwave HTSC – resonator – stabilized oscillator / Superconductivity: Physics, Chemistry, Technology (SPCT) – 1994. – 7(1). – PP. 169-171.
13. Абраменков А.И., Бродуленко И.И., Богданов Ю.М. и др. Миниатюрный электрически перестраиваемый стабильный транзисторный генератор малой мощности//Электронная техника.Сер.1,Электроника СВЧ.-1991.-Вып.3.-С.44.
14. Королев А.Н., Абакумова Н.В., Богданов Ю.М. и др. Генератор управляемый напряжением на ПТШ // Электронная техника. Сер.1, СВЧ - техника. - 2006. - Вып.2. - С.54 - 57.
15. Ю.М. Богданов, В.Г. Красник, В.Г. Лапин и др. Ряды устройств для преобразования частоты на основе многофункциональной GaAs МИС// Электронная техника. Сер.1, СВЧ - техника. - 2007.- Вып. 1. - С. 42 - 47.

Подписано в печать 27.04.07

Формат 60x80/16. Объём 1 усл. печ. лист.

Тираж 50 экз. ризограф ОАО «Исток Аудио Интернэйшнл»