

На правах рукописи



Березняк Анатолий Федорович

**СИНТЕЗ И РЕАЛИЗАЦИЯ
ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ СВЧ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ
С КОНТРОЛИРУЕМЫМ УРОВНЕМ НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ
ДЕЦИМЕТРОВОГО И САНТИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН**

Специальность 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства
телевидения

АВТОРЕФЕРАТ
на соискание учёной степени кандидата технических наук

Санкт-Петербург 2020

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Научный руководитель: Коротков Александр Станиславович
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Томашевич Сергей Викторович
доктор технических наук, профессор
Профессор кафедры радиосистем и обработки сигналов, СПбГУТ

Будяков Алексей Сергеевич
кандидат технических наук,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана), кафедра ИУ-4
«Проектирование и технология производства электронной аппаратуры».

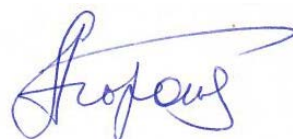
Защита состоится «__» _____ 2020 года в «__» часов на заседании диссертационного совета У.05.12.04 в ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, 4 учебный корпус, ауд. 305.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте университета www.spbstu.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2020 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета У.05.12.04
доктор технических наук, профессор

Коротков Александр Станиславович



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

СВЧ переключатели входят в состав аппаратуры систем связи, радиолокации, навигации, управления. В настоящее время в дециметровом/сантиметровом диапазонах длин волн достигнуты следующие параметры СВЧ переключателей: в диапазоне 6–10 ГГц вносимые потери составляют до 1,2 дБ, развязка достигает 28 дБ, мощность компрессии на 1 дБ составляет 25–34 дБм. Дальнейшее развитие СВЧ переключателей происходит по трем направлениям: повышение рабочих частот до десятков гигагерц и более, интеграция СВЧ переключателей в состав более сложных СВЧ монолитных интегральных схем (СВЧ МИС), освоение новых технологий изготовления МИС.

В настоящее время (2020 г.) большинство публикаций посвящены инновациям в кремниевых приемопередающих модулях (ППМ) 5-го поколения, подчеркивается, что большую часть площади СВЧ МИС на кристалле ППМ занимают СВЧ переключатели; утверждается, что значительную часть составляющих интермодуляционных искажений создают СВЧ переключатели; признается, что динамический диапазон пары «арсенид галлиевый СВЧ переключатель/малошумящий усилитель» шире динамического диапазона аналогичной пары, выполненной по технологии «кремний-на-изоляторе». Авторы признают, что передающая часть ППМ, изготовленная на полупроводниках группы материалов АЗВ5 (GaAs и GaN), останется недостижимой по плотности излучаемой мощности для технологии «кремний-на-изоляторе».

Ежегодно в мире продается около двух миллиардов смартфонов 4-го поколения. Предполагается, что продажи смартфонов 5-го поколения будут еще выше. Даже при таких огромных объемах производства себестоимость СВЧ части смартфона составляет от 12 до 15 долларов. Предвидится, что себестоимость СВЧ части смартфона 5-го поколения будет составлять от 18 до 20 долларов. Очевидно, что потребность в приемопередающих модулях радиолокационных систем значительно меньше потребности в смартфонах (что увеличивает себестоимость производства), но требования к динамическому диапазону и передаваемой мощности существенно выше. Разрешить данное противоречие позволяют технологии на основе полупроводников группы АЗВ5. Таким образом, проблема проектирования и изготовления входной/выходной части (т.е. антенного переключателя) СВЧ МИС приемопередающих модулей дециметрового и сантиметрового диапазона длин волн остается актуальной и в настоящее время.

Существующие методы синтеза (проектирования) СВЧ переключателей основываются на представлении переключающих элементов в виде дискретных

компонентов с паразитными (индуктивными/емкостными) связями. Методы синтеза монолитных интегральных схем переключателей, основывающиеся на представлении переключающих элементов в виде интегральных компонентов, не развиты, в том числе, для МИС СВЧ переключателей на основе полупроводников группы АЗВ5. Это не позволяет считать известные решения оптимальными, а задачу синтеза СВЧ переключателей полностью решенной.

Цель работы

Целью диссертации является разработка метода синтеза и практическая реализация интегральных схем твердотельных СВЧ переключателей с контролируемым уровнем нелинейных искажений для использования в приемопередающих модулях дециметрового и сантиметрового диапазона длин волн.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) Разработать методику синтеза СВЧ переключателя на основе полупроводников группы АЗВ5.
- 2) Разработать обобщенную (линейную и нелинейную) модель полевого транзистора, предназначенную для решения задачи синтеза СВЧ переключателей.
- 3) Разработать методику оценки нелинейных параметров МИС СВЧ переключателя по нелинейным свойствам полевых транзисторов группы АЗВ5.
- 4) Синтезировать и изготовить интегральные схемы СВЧ переключателей на основе полупроводников группы АЗВ5.
- 5) Провести экспериментальные исследования, сравнить теоретические и измеренные характеристики реализованных СВЧ переключателей на основе полупроводников группы АЗВ5.

Научная новизна результатов диссертационной работы

- 1) Предложено рассматривать СВЧ переключатель как эквивалентную схему параметрического (переключаемого) частотного фильтра, что позволяет использовать методы синтеза частотных фильтров для синтеза СВЧ переключателей.
- 2) Предложено характеризовать реактивные элементы модели полевого транзистора, предназначенной для решения задачи синтеза СВЧ переключателей, с помощью удельных величин индуктивности сток-исток открытого транзистора и емкости сток-исток закрытого транзистора, что позволяет рассчитать транзистор по результатам решения задачи синтеза по величинам индуктивности или емкости фильтра-прототипа.

3) Предложено проводить синтез СВЧ переключателя с использованием теории синтеза частотно-избирательных устройств по общему ФНЧ-прототипу для двух режимов функционирования «включено»/«выключено» СВЧ переключателя.

4) Предложено использовать для синтеза прототипа СВЧ переключателя аппроксимирующую функцию Баттерворта, нормированную не по частоте среза, а по максимальной рабочей частоте СВЧ переключателя при допустимой неравномерности АЧХ в полосе пропускания прототипа, равной минимальной развязке СВЧ переключателя.

5) Предложено ввести новые удельные нелинейные параметры полевых транзисторов, не зависящие от ширины затвора транзистора, которые используются для оценки точки пересечения интермодуляционных составляющих 3-го порядка синтезируемого СВЧ переключателя.

Теоретическая значимость результатов диссертационной работы

1) Разработана обобщенная компактная модель полевого транзистора для синтеза МИС СВЧ переключателя, позволяющая оценивать требуемую развязку, вносимые потери и интермодуляционные искажения в процессе синтеза СВЧ переключателя, осуществляя параметрическую оптимизацию.

2) Разработана методика синтеза МИС СВЧ переключателя для достижения максимальной развязки при контролируемых вносимых потерях, КСВН и входной мощности компрессии на 1 дБ.

3) Разработана методика синтеза МИС СВЧ переключателя для достижения минимальных вносимых потерь при контролируемых вносимых потерях, КСВН и входной мощности компрессии на 1 дБ.

4) Разработана процедура оценки интермодуляционных искажений МИС СВЧ переключателя как этапа синтеза СВЧ переключателя.

Практическая значимость результатов диссертационной работы

1) Произведена идентификация параметров обобщенной компактной модели полевого транзистора основе PDK фирм изготовителей АО «Светлана-Рост» и WIN Semiconductors.

2) Синтезирована и изготовлена МИС SPDT СВЧ переключателя С диапазона частот по технологии DrHEMT05 АО «Светлана-Рост».

3) Синтезирована и изготовлена МИС SPDT СВЧ переключателя X диапазона частот по технологии WIN_PD2500 с многозатворными транзисторами фирмы WIN Semiconductors.

Методология и методы исследования

При решении поставленных задач использовались методы анализа и синтеза линейных и нелинейных электрических цепей. Расчеты и моделирование проводились на ЭВМ с применением программных пакетов, входящих в состав САПР NI AWR MWO (для указанных пакетов программ университет имеет лицензионные соглашения).

Положения, выносимые на защиту

1) Синтез СВЧ переключателя целесообразно проводить с использованием методики синтеза частотных фильтров по общему ФНЧ-прототипу для обоих режимов «включено»/«выключено» СВЧ переключателя.

2) Чтобы использовать методы синтеза частотных фильтров для синтеза СВЧ переключателей необходимо разработать компактную модель полевого транзистора и выразить параметры транзисторов в состоянии «включено»/«выключено» через R , L , C параметры данной модели.

3) Для решения задачи аппроксимации в синтезе ФНЧ-прототипа необходимо использовать аппроксимирующую функцию, нормированную не по частоте среза, а по максимальной рабочей частоте СВЧ переключателя при допустимой неравномерности АЧХ в полосе пропускания, равной минимальной развязке СВЧ переключателя.

4) Для уменьшения вносимых потерь СВЧ переключателя в режиме «включено» следует расширить элементную базу структурного синтеза МИС СВЧ переключателя введением дополнительных реактивных L и C элементов, минимизирующих потери на отражение, которые обусловлены реактивными составляющими импедансов открытых/закрытых транзисторов.

5) Оценивать нелинейные свойства полевых транзисторов следует по двум параметрам ИРЗ (точка пересечения интермодуляционных искажений третьего порядка): $ИРЗ_{on}$ для транзистора в состоянии «включено», и $ИРЗ_{off}$ для транзистора в состоянии «выключено», причем для расчета параметров $ИРЗ_{on}$ и $ИРЗ_{off}$ необходимо ввести инвариантные относительно ширины затвора транзистора параметры, а именно: удельные параметры $\sqrt{ИРЗ_{on_ud}} \left[\frac{мВт^{1/2}}{мм} \right]$ и $\sqrt{ИРЗ_{off_ud}} [мВт^{1/2} \times мм]$, позволяющие оценивать ИРЗ СВЧ переключателя без использования пакетов САПР.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов работы и обоснованность научных выводов подтверждается соответствием представленных аналитических расчетов и результатов

структурного, параметрического и топологического синтеза СВЧ переключателей с данными экспериментальных исследований, полученных на современном оборудовании (анализатор цепей R&S ZVA-67 с блоком расширения ZVAX-TRM50, анализатор сигналов и спектра R&S FSVA30), и с данными нелинейного анализа, выполненного с помощью программного пакета APLAC HB, входящего в состав САПР NI AWR MWO.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях: The VI international conference “Electronics and applied physics” October, 20-23, 2010, Kyiv, Ukraine; 19-я Международная научно-техническая конференция «Современные телевидение и радиоэлектроника», 15-16 марта 2011, Москва; 2-я научная конференция «Интегральные схемы и микроэлектронные модули», 26-30 сентября 2016, Республика Крым, Алушта.

По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ, из них 3 статьи опубликованы в журналах, входящих в Перечень ВАК, 2 статьи опубликованы в журнале, входящем в базу Scopus, 6 статей опубликованы в журналах, входящих в базу РИНЦ, получен 1 патент и 1 государственная регистрация топологии интегральной микросхемы.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, двух приложений, и списка литературы. Общий объем диссертационной работы составляет 131 страницу, в том числе 112 страниц основного текста, 64 рисунка, 12 таблиц, список литературы из 139 наименований на 11 страницах.

Вклад автора в разработку проблемы

Основные научные положения, теоретические выводы, практические рекомендации, расчеты, моделирование и экспериментальные результаты в диссертационной работе разработаны и выполнены автором самостоятельно.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность, научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы цель и задачи исследования, изложены положения, выносимые на защиту.

В первом разделе приведен обзор физических принципов работы, технологии изготовления, схемотехники и применений твердотельных СВЧ переключателей на полевых транзисторах. Рассмотрены: основные сведения теории СВЧ переключателей, типы твердотельных СВЧ переключателей, технологии изготовления и схемотехника

твердотельных СВЧ переключателей, применение и перспективы применения твердотельных СВЧ переключателей. На основе выполненного обзора обозначены цель и задачи диссертационной работы.

Во втором разделе сформулированы основные направления исследования приведшие к разработке методики синтеза МИС СВЧ переключателя на полевых транзисторах группы АЗВ5. Приведены: классификация методов синтеза (структурный, параметрический и конструкционный синтез), классификация моделей электронных компонентов (физические, компактные, функциональные модели). Обоснована необходимость создания новой компактной модели полевого транзистора (ПТ), для чего было проведено сравнение свойств фильтров частот и свойств СВЧ переключателей (таблица 1).

Таблица 1 Сравнение свойств фильтров частот и свойств СВЧ переключателей

| Свойства/параметры фильтров | Свойства/параметры переключателей |
|--|---|
| Структура - лестничная схема | Структура - лестничная схема |
| Фильтры подразделяются на отражательные и поглощающие. Отражательные фильтры возвращают СВЧ энергию обратно в генератор за пределами полосы пропускания. Поглощающие фильтры рассеивают СВЧ энергию внутри фильтра на частотах за пределами полосы пропускания | Переключатели подразделяются на отражательные и аттенуаторные. Отражательные СВЧ переключатели возвращают СВЧ энергию обратно в генератор в режиме «выключено». Аттенуаторные СВЧ переключатели рассеивают СВЧ энергию внутри переключателя в режиме «выключено». |
| Элементарные ячейки фильтров представляют двухпортовые компоненты, из которых в частотной области создаются распределители СВЧ энергии: избирательные цепи | Элементарные ячейки переключателей представляют двухпортовые компоненты, из которых во временной области создаются распределители СВЧ энергии: коммутаторы каналов |
| Фильтры характеризуются основными параметрами: вносимые потери, КСВН, развязка каналов. | Переключатели характеризуются основными параметрами: вносимые потери, КСВН, развязка каналов. |

Проведенное сопоставление позволяет представить СВЧ переключатель, как переключаемый (параметрический) фильтр частот, который в зависимости от параметра – своего внутреннего импеданса – представляет либо фильтр нижних частот (ФНЧ) в режиме ВКЛ (включено), либо фильтр верхних частот (ФВЧ) в режиме ВЫКЛ (выключено). В этой

связи, для синтеза СВЧ переключателей в работе предложено использовать классические методы синтеза фильтров частот. Чтобы использовать методы синтеза фильтров частот для синтеза СВЧ переключателей необходимо преобразовать имеющиеся модели в компактные модели на основе элементов RLC комбинаторного пространства, которое используется для синтеза фильтров частот (см. рисунок 1).

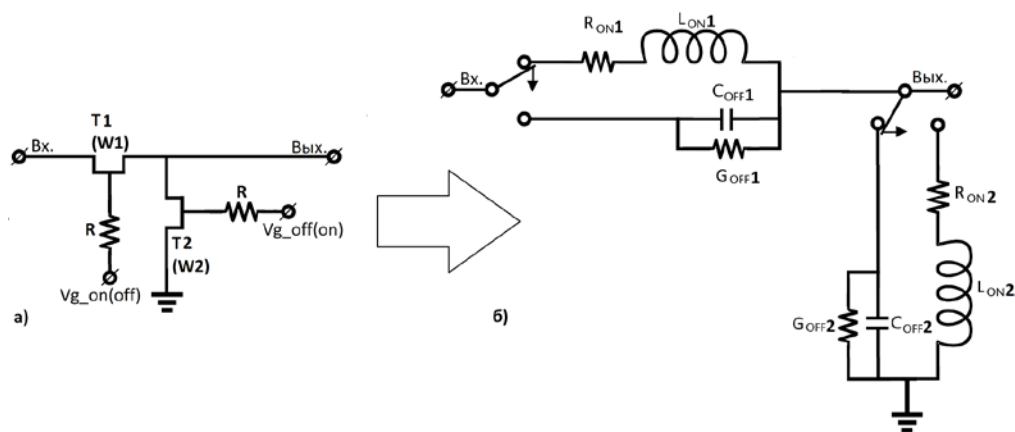


Рисунок 1. а) Принципиальная схема Г-образного СВЧ переключателя на ПТ;
б) представление Г-образного СВЧ переключателя через основные параметры элементов компактной модели ПТ (без учета элементов цепи управления R)

В таблице 2 приведены параметры компактной модели ПТ для технологии рНЕМТ05 АО «Светлана-Рост». Основные параметры (параметры ПТ с шириной затвора равной 1 мм) непосредственно связаны с величинами элементов, изображенных на рисунке 1 (с шириной затворов W1 и W2), производные параметры используются для расчета элементов фильтра-прототипа.

Таблица 2. Параметры компактной модели ПТ для технологии рНЕМТ05

| Основные параметры | | | | Производные параметры | | | |
|--------------------|--------------------|------------------------------------|---------------------|---|---|---|---|
| R _{on_ud} | L _{on_ud} | G _{off_ud} | C _{off_ud} | Q $= \frac{1}{R_{on_ud}} \sqrt{\frac{L_{on_ud}}{C_{off_ud}}}$ | ρ_x $= \sqrt{\frac{L_{on_ud}}{C_{off_ud}}}$ | f_r $= \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{on_ud} C_{off_ud}}}$ | K $= \frac{2\pi f_{p_max}}{2\pi f_r}$ |
| 1.575 Ом*мм | 0.046 нГн*мм | 8.16x10 ⁻⁵ 1/(Ом*мм) | 0.332 пФ/мм | Q=7.47 | $\rho_x=11.771$ Ом | F _r =40.726 Гц | $f_{p_max}=3$ ГГц K=0,07366 |

Показано, что по нормированным величинам LC элементов ФНЧ-прототипа с единичными сопротивлениями генератора и нагрузки, например, для 3-го порядка (L1 = g1, C2 = g2, L3 = g3) синтезируется СВЧ переключатель как в режиме ВКЛ, так и в режиме ВЫКЛ. Поскольку важно обеспечить монотонность АЧХ и линейность ФЧХ СВЧ переключателей, рассматривались аппроксимации максимально гладкой АЧХ фильтра

Баттерворта и линейной ФЧХ фильтра Бесселя. Учитывая необходимость обеспечения требуемой развязки, окончательно в качестве аппроксимирующей функции выбрана передаточная функция Баттерворта. Синтез СВЧ переключателя проводился по величине требуемой развязки, т.к. требуемые вносимые потери можно обеспечить достаточно «широким» последовательным транзистором Т1 (W1), (рисунок 1).

Предложено использовать для синтеза прототипа СВЧ переключателя аппроксимирующую функцию Баттерворта, нормированную не по частоте среза, а по максимальной рабочей частоте СВЧ переключателя при допустимой неравномерности АЧХ в полосе пропускания прототипа, равной минимальной развязке (A_{off_min} [дБ]) СВЧ переключателя. В результате чего с помощью процедуры разложения дробно-рациональной функции на элементарные дроби находим нормированную индуктивность g_1 и емкость g_2 ФНЧ-прототипа:

$$g_1 = \sqrt{2\varepsilon_p} \quad (1a) \quad g_2 = \sqrt{2\varepsilon_p} \quad (1б)$$

где $\varepsilon_p = \sqrt{10^{A_{off_min}[дБ]/10} - 1}$ – коэффициент неравномерности, который соответствует величине требуемой развязки (A_{off_min} [дБ]). Зная величины g_1 и g_2 находим

$$W_1[мм] = \frac{1}{K \frac{Z_0}{\rho_X} g_1} \quad (2) \quad W_2 = \frac{g_2 R_{on_ud} \sqrt{1+K^2 Q^2}}{Z_0} \quad (3)$$

Процедуру синтеза проиллюстрируем примером, используя значения параметров из таблицы 2. Пусть необходимо синтезировать SPST СВЧ переключатель, обеспечивающий на частоте $f_{p_max}=3ГГц$ развязку равную или больше A_{off_min} [дБ] = 30 дБ.

1) Найдем ФНЧ-прототип фильтра Баттерворта, т.е. для требуемой развязки A_{off_min} [дБ] = 30 дБ, найдем нормированную индуктивность и емкость согласно (1а), (1б):

$$g_1 = g_2 = \sqrt{2\varepsilon_p} = \sqrt{2\sqrt{10^{A_{off_min}[дБ]/10} - 1}} = \sqrt{2\sqrt{999}} = 7,95.$$

2) Найдем геометрические размеры последовательного ПТ (ширину затвора рНЕМТ транзистора) согласно (2):

$$W_1 = \frac{1}{K \frac{Z_0}{\rho_X} g_1} = \frac{1}{0,07366 \frac{50}{11,771} 7,95} = 0,402 \text{ мм.}$$

3) Найдем геометрические размеры параллельного ПТ (ширину затвора рНЕМТ транзистора) согласно (3):

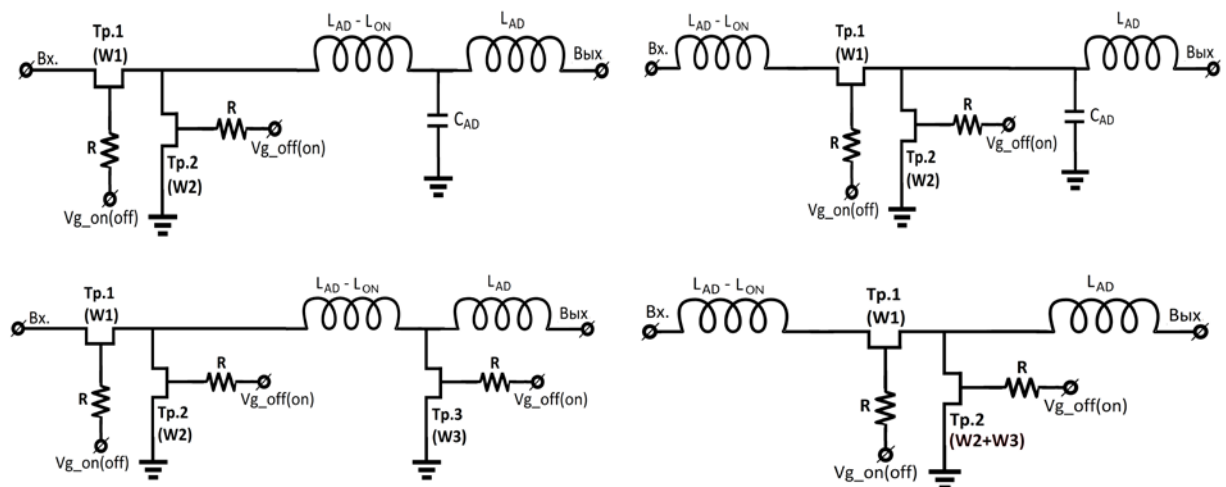
$$W_2 = \frac{g_2 R_{on_ud} \sqrt{1+K^2 Q^2}}{Z_0} = \frac{7,95 * 1,575 * 1,141}{50} = 0,286 \text{ мм.}$$

Зная W_1 и W_2 , рисунок 1, находим вносимые потери (A_{on_max} [дБ]). Повторив шаги 1-3 для разных значений A_{off_min} [дБ], построим таблицу 3.

Таблица 3. Основные параметры синтезированных СВЧ переключателей

| A_{off_min} [дБ] | W_1 [мм] | W_2 [мм] | A_{on_max} [дБ] |
|---------------------|------------|------------|--------------------|
| 20 | 0,716 | 0,160 | 0,196 |
| 30 | 0,402 | 0,286 | 0,343 |
| 40 | 0,226 | 0,508 | 0,616 |
| 50 | 0,127 | 0,904 | 1,121 |
| 60 | 0,071 | 1,607 | 2,108 |

Из таблицы 3 видно, что чем больше требуется развязка, тем «уже» будет последовательный транзистор. «Узкий» последовательный транзистор приводит к большим вносимым потерям (большое R_{on}), и к увеличению коэффициента стоячей волны напряжения (КСВН) как на входе, так и на выходе СВЧ переключателя. Следовательно, необходимо внести дополнительный шаг на этапе структурного синтеза, добавив элементы согласования L_{AD} и C_{AD} (L_{ON} – индуктивность транзистора $Tr.1$). Рассмотрим два варианта структурного синтеза: вариант а) с Т-образной L-C-L схемой на выходе СВЧ переключателя, (рисунок 2 а), и вариант б) L-C-L схема в комбинации с внутренними реактивностями транзисторов, (рисунок 2 б).



а) Т-образное согласование

б) Г-образное согласование

Рисунок 2. Схемы согласования СВЧ переключателя

Если емкость C_{AD} в схеме согласования заменить закрытым транзистором, то в режиме ВЫКЛ СВЧ переключателя получим дополнительное увеличение развязки. Дополнительное увеличение развязки позволяет уменьшить исходное требование к величине развязки (A_{off_min} [дБ]) на полученную избыточную величину и повторить процедуру синтеза для скорректированной величины (A_{off_min} [дБ]). На этом синтез МИС SPST переключателя завершен.

Синтез SPnT СВЧ переключателя, где n – число выходов переключателя, проводится параллельным подключением к входу SPST переключателя в состоянии ВКЛ $(n - 1)$ штук SPST переключателей в состоянии ВЫКЛ. Входной импеданс SPST переключателя в состоянии ВЫКЛ представляет емкость с потерями (основная часть емкости обеспечивается последовательным закрытым транзистором, основная часть потерь обеспечивается параллельным открытым транзистором). Реактивные потери $(n - 1)$ SPST переключателей компенсируются добавлением к входу СВЧ переключателя последовательной катушки индуктивности. Активные потери $(n - 1)$ SPST переключателей в состоянии ВЫКЛ приводят к увеличению вносимых потерь в n -ом SPST переключателе в состоянии ВКЛ. На этом теоретическую часть методики синтеза МИС СВЧ переключателей на полевых транзисторах группы АЗВ5 считаем завершённой.

В третьем разделе методика синтеза, предложенная во втором разделе, дополняется методикой оценки нелинейных параметров МИС СВЧ переключателя на основе ПТ группы АЗВ5. Как показатель нелинейности СВЧ устройств выбран параметр ПРЗ (точка пересечения интермодуляционных искажений 3-го порядка на входе). Показана методика расчета параметра ПРЗ для цепочки 4-полюсников с известными коэффициентами передачи и параметрами ПРЗ. Предложено использовать данную методику для оценки параметра ПРЗ СВЧ переключателя по известным вносимым потерям и параметрам ПРЗ ПТ в открытом (ON) и закрытом (OFF) состоянии. Для чего линейная модель ПТ, рисунок 1, заменяется нелинейной компактной моделью ПТ, рисунок 3.

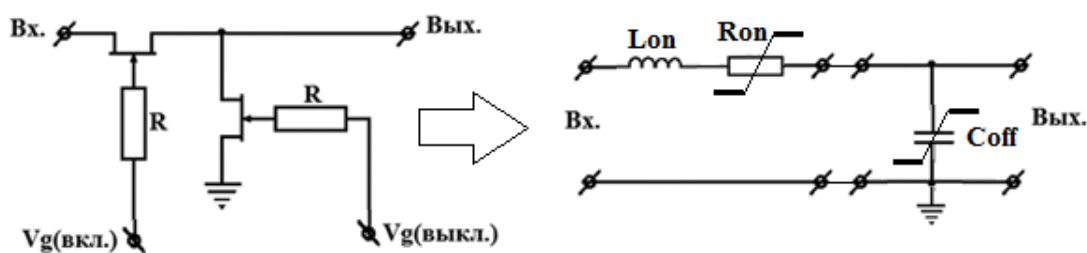


Рисунок 3. Представление СВЧ переключателя как нелинейной системы, состоящей из последовательного соединения 4-полюсников

Для моделирования транзистора в состоянии ON воспользуемся методом степенных рядов, а именно – разложением нелинейной передаточной функции в ряд Тейлора. На рисунке 4 показано применение частотно-избирательной цепи с последовательной нелинейностью для моделирования последовательного транзистора в состоянии ON. Здесь, $V_S(t)$ представляет напряжение сигнала на входе индуктивности $L_{on} = \frac{L_{on_ud}}{W}$, $V(t)$ – падение напряжения сигнала на нелинейном резисторе $R_{on} = \frac{R_{on_ud}}{W}$, $i(t)$ – малосигнальная

составляющая тока стока транзистора, которую можно разложить в ряд Тейлора вокруг точки смещения на стоке транзистора в состоянии ON.

$$f(v) = F(V_{d0} + v) - F(V_{d0}) = \frac{dF}{dV} \Big|_{V=V_{d0}} v + \frac{1}{2} \frac{d^2F}{dV^2} \Big|_{V=V_{d0}} v^2 + \dots + \frac{1}{n!} \frac{d^n F}{dV^n} \Big|_{V=V_{d0}} v^n$$

где $V = V_{d0}$ - смещение на стоке транзистора в состоянии ON, обычно $V_{d0} = 0$ В.

Перепишем полученное выражение в виде:

$$f(v) = a_1 v + a_2 v^2 + \dots + a_n v^n$$

Получили процедуру экстракции параметров системы с помощью производных n -го порядка:

$$a_1 \equiv \frac{dF}{dV} \Big|_{V=V_{d0}}; a_2 \equiv \frac{1}{2} \frac{d^2F}{dV^2} \Big|_{V=V_{d0}}; \dots; a_n \equiv \frac{1}{n!} \frac{d^n F}{dV^n} \Big|_{V=V_{d0}}$$

а также связность модели, т.е. плавный переход от нелинейной модели к линейной при уменьшении амплитуды входного сигнала.

Для построения зависимости значения параметра ИРЗ последовательного транзистора в состоянии ON (4-полюсника, содержащего L_{on} и R_{on} , рисунок 3) от ширины затвора транзистора W , подставим выражение для нелинейного резистора $R_{on} = \frac{R_{on_{ud}}}{W}$ в нелинейную функцию $f(v)$. Получим выражение для тока слабого сигнала на выходе 4-полюсника:

$$i(v) = a_1 v + a_2 v^2 + \dots + a_n v^n = \frac{1}{W} \left[\frac{d(R_{on_{ud}})}{dv} v + \frac{1}{2} \frac{d^2(R_{on_{ud}})}{dv^2} v^2 + \dots + \frac{1}{n!} \frac{d^n(R_{on_{ud}})}{dv^n} v^n \right]$$

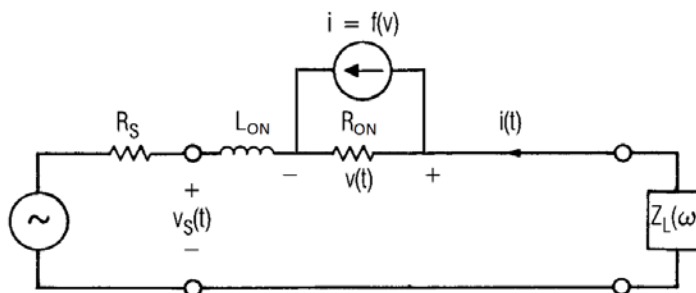


Рисунок 4. Модель последовательного транзистора в состоянии ON (частотно-избирательная цепь с последовательной нелинейностью)

Следовательно, $\frac{1}{W}$ является масштабирующим коэффициентом как для корня квадратного из мощности на основной частоте, так и для корней квадратных из мощностей на интермодуляционных частотах. Это позволяет идентифицировать точки пересечения интермодуляционных искажений интересующих порядков IPN на транзисторе известной ширины W при заданном смещении (состояние ON) и привести полученные результаты к транзистору шириной 1 мм. Получили новый параметр $\sqrt{IPN_{on_{ud}}} [Вт^{1/2}/мм]$, назовем его удельной точкой пересечения интермодуляционных искажений N -го порядка, (чем шире

транзистор, тем он ближе к линейному резистору), позволяющий рассчитать интермодуляционные искажения транзистора в состоянии ON с заданной шириной затвора.

Для моделирования транзистора в состоянии OFF (4-полюсника, содержащего C_{off} , рисунок 3) воспользуемся разложением нелинейной передаточной функции в ряд Вольтерра. При анализе нелинейной емкости $C_{off} = C_{off_ud} W$ воспользуемся тем, что метод рядов Вольтерра является степенным рядом Тейлора для инерционных систем (систем с памятью). Применим тот же подход, который использован при анализе транзистора в состоянии ON. Найдем изменение заряда q на обкладках конденсатора (транзистора в состоянии OFF, подключенного параллельно нагрузке):

$$q = f_Q(V_0 + v) - f_Q(V_0) = \frac{d}{dV} f_Q(V) \Big|_{V=V_0} v + \frac{1}{2} \frac{d^2}{dV^2} f_Q(V) \Big|_{V=V_0} v^2 + \dots \frac{1}{n!} \frac{d^n (f_Q(V))}{dV^n} \Big|_{V=V_0} v^n$$

Здесь подразумевается, что величина заряда зависит от времени $q(t)$. Тогда, ток слабого сигнала в нелинейной емкости будет равен:

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{d}{dV} f_Q(V) \Big|_{V=V_0} \frac{dv}{dt} + \frac{d^2}{dV^2} f_Q(V) \Big|_{V=V_0} v \frac{dv}{dt} + \dots \frac{1}{(n-1)!} \frac{d^n (f_Q(V))}{dV^n} \Big|_{V=V_0} v^{(n-1)} \frac{dv}{dt}$$

Перепишем полученное выражение в виде:

$$i = [C_1(V_0) + C_2(V_0)v + C_3(V_0)v^2 + \dots] \frac{dv}{dt},$$

что представляет разложение в ряд дифференциальной емкости. В рассматриваемом случае это будет емкость сток-исток при смещении на затворе, обеспечивающем состояние OFF:

$$C_1(V_0) \equiv C_{off} = C_{off_ud} W$$

$$C_n(V_0) \equiv \frac{1}{(n-1)!} \frac{d^n(C_{off})}{dV^n} = \frac{W}{(n-1)!} \frac{d^n(C_{off_ud})}{dV^n}.$$

Получили, что для транзистора в состоянии OFF ширина затвора W является масштабирующим фактором как для корня квадратного из мощности на основной частоте, так и для корней квадратных из мощностей на интермодуляционных частотах. Этот факт позволяет идентифицировать точки пересечения интермодуляционных искажений интересующих порядков IPN на транзисторе известной ширины W при заданном смещении (состояние OFF) и привести полученные результаты к транзистору шириной 1 мм. Получили новый параметр $\sqrt{IPN_{off_ud}}$ [мВт^{1/2} * мм], позволяющий оценить интермодуляционные искажения транзистора с заданной шириной затвора W в состоянии OFF (чем шире транзистор, тем больше величина нелинейных токов в нем генерируемых).

Идентификация (определение величин) предложенных нелинейных удельных параметров проводилась по PDK фирмы изготовителя с помощью программного пакета APLAC HB, входящего в состав САПР NI AWR MWO. Объединив линейную и нелинейную модели ПТ, получили обобщенную компактную модель ПТ, (таблица 4).

Таблица 4 Параметры обобщенной компактной модели ПТ для технологии WIN_PD2500

| Основные параметры | | | | Нелинейные параметры | |
|--------------------|---------|-----------------------|---------|---|-------------------------|
| Ron_ud | Lon_ud | Goff_ud | Coff_ud | $\sqrt{IP3_{on_ud}}$ | $\sqrt{IP3_{off_ud}}$ |
| 1.785 | 0.12775 | 2.78×10^{-4} | 0.1168 | $876,92 \frac{\text{мВт}^{\frac{1}{2}}}{\text{мм}}$ | 568,35 |
| Ом*мм | нГн*мм | 1/(Ом*мм) | пФ/мм | | мВт ^{1/2} * мм |

Таким образом, после расчета численных значений ширины затворов транзисторов (W [мм]) оцениваются следующие основные параметры схемы СВЧ переключателя (без полного построения схемы): уровень интермодуляционных искажений СВЧ переключателя, уровень требуемой развязки, уровень вносимых потерь. Предлагаемый подход позволяет провести параметрическую оптимизацию схемы по заданному критерию. Например, осуществить минимизацию уровня нелинейных искажений при контролируемом уровне вносимых потерь и развязки без проведения моделирования схемы с помощью САПР.

В четвертом разделе приведены экспериментальные результаты. Синтезирована и изготовлена МИС SPDT СВЧ переключателя С диапазона частот по технологии DpHEMT05 АО «Светлана-Рост», (рисунок 5).

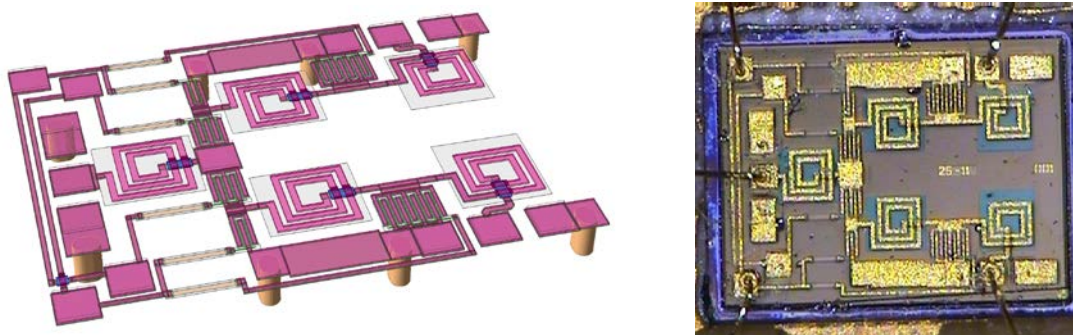


Рисунок 5 Топология и фотография кристалла СВЧ МИС SPDT переключателя для С диапазона частот.

Данная МИС демонстрирует возможности процедуры синтеза для достижения максимальной развязки 53 дБ, при приемлемых вносимых потерях 0,8 дБ, $K_{СВН} \leq 1,2$ и мощности компрессии на 1 дБ 27 дБм. По максимальной развязке 53 дБ синтезированная МИС SPDT СВЧ переключателя превосходит известные зарубежные аналоги, что является результатом целенаправленного синтеза для достижения максимальной развязки.

Синтезирована и изготовлена МИС SPDT СВЧ переключателя X диапазона частот по технологии WIN_PD2500 с многозатворными транзисторами фирмы WIN Semiconductors, (рисунок 6).

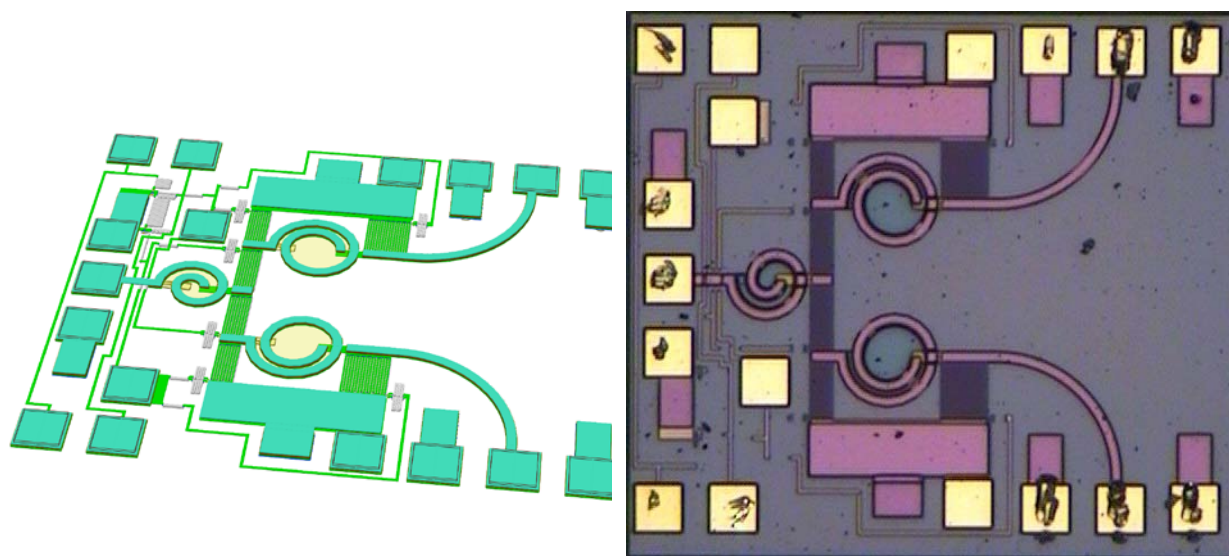


Рисунок 6. Топология и фотография кристалла СВЧ МИС SPDT переключателя для X-диапазона частот, синтезированного на базе технологии WIN_PD2500

Данная МИС демонстрирует возможности процедуры синтеза для достижения минимальных вносимых потерь 0,8 дБ, при приемлемой развязке 33 дБ, $K_{СВН} \leq 1,5$, мощности компрессии на 1 дБ – более 30 дБм. По вносимым потерям синтезированная МИС SPDT СВЧ переключателя превосходит известные зарубежные аналоги, что является результатом целенаправленного синтеза для достижения минимальных вносимых потерь.

В заключении сформулированы следующие выводы по диссертационной работе.

1) Разработана методика синтеза МИС СВЧ переключателя на полупроводниках группы АЗВ5, в основе которой лежит теория структурного и параметрического синтеза частотно-избирательных цепей – фильтров. При решении задачи структурного синтеза предложено расширить элементный базис схем переключателей введением дополнительного элемента, а именно, индуктивности. Что позволило свести задачу к параметрическому синтезу схемы

переключателя при известном решении задачи структурного синтеза. Предложенная методика реализована в двух вариантах: методика синтеза СВЧ переключателя, нацеленная на достижение максимальной развязки (при заданном уровне вносимых потерь); методика синтеза СВЧ переключателя, нацеленная на достижение минимальных вносимых потерь (при заданном уровне развязки). В процессе синтеза в обоих вариантах контролируется уровень нелинейных искажений по параметру $IP3$.

2) Разработана методика оценки нелинейных параметров МИС СВЧ переключателя на основе нелинейных параметров полевых транзисторов группы АЗВ5, в которой развита методика анализа нелинейных искажений СВЧ переключателя, в частности, расчет параметра $IP3$, на основе представления каждого переключающего элемента в структуре СВЧ переключателя как квазилинейного 4-полюсника. В результате такого представления формируется схема, параметр $IP3$ которой равен параметру $IP3$ СВЧ переключателя. Такой подход дал возможность выразить нелинейные параметры СВЧ переключателя через нелинейные параметры его переключающих элементов (транзисторов).

3) Синтезированы и изготовлены две интегральные схемы СВЧ переключателей:

МИС SPDT переключателя С диапазона частот (синтезирована для достижения максимальной развязки) на основе GaAs pHEMT технологии АО «Светлана-Рост»;

МИС SPDT переключателя Х диапазона частот (синтезирована для достижения минимальных вносимых потерь) на основе GaAs pHEMT технологии WIN Semiconductors.

4) Проведены экспериментальные исследования, при которых проводилось сравнение теоретических и измеренных характеристик изготовленных МИС СВЧ переключателей:

МИС SPDT переключателя С диапазона частот по технологии DpHEMT05 АО «Светлана-Рост» демонстрирует возможности процедуры синтеза для достижения максимальной развязки 53 дБ при контролируемых вносимых потерях 0,8 дБ, $K_{CBH} \leq 1,2$, и мощности компрессии на 1 дБ 27 дБм. По максимальной развязке 53 дБ синтезированная МИС SPDT СВЧ переключателя превосходит известные зарубежные аналоги не менее, чем на 20 дБ, что является результатом синтеза по критерию достижения максимальной развязки;

МИС SPDT СВЧ переключателя Х диапазона частот по технологии WIN_PD2500 с многозатворными транзисторами фирмы WIN Semiconductors демонстрирует возможности процедуры синтеза для достижения минимальных вносимых потерь 0,8 дБ, при контролируемой развязке 33 дБ, $K_{CBH} \leq 1,5$, мощности компрессии на 1 дБ – более 30 дБм. По вносимым потерям синтезированная МИС SPDT СВЧ переключателя превосходит известные зарубежные аналоги не менее, чем на 0,4 дБ, что является результатом синтеза по критерию достижения минимальных вносимых потерь.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Березняк А.Ф., Коротков А.С. Твердотельные СВЧ-переключатели: схемотехника, технологии изготовления, тенденции развития. Обзор. Часть 1 // Радиоэлектроника. ИзвВУЗов, 2013, Т.56, №4, С.3–28. (Scopus, РИНЦ, ВАК)
2. Березняк А.Ф., Коротков А.С. Твердотельные СВЧ-переключатели: схемотехника, технологии изготовления, тенденции развития. Обзор. Часть 2 // Радиоэлектроника. ИзвВУЗов, 2013, Т.56, №5, С.3–20. (Scopus, РИНЦ, ВАК)
3. Гук В.Г., Филаретов Г.А., Калинин Б.В., Березняк А.Ф., Красовицкий Д.М. Трехэлектродный высокочастотный полупроводниковый прибор, Патент РФ № 2354010, 27.04.09.
4. Березняк А.Ф., Коротков А.С., Балашов Е.В. Трансформация синтеза фильтров частот в синтез твердотельных СВЧ переключателей, 2-я научная конференция «Интегральные схемы и микроэлектронные модули» Сборник докладов, Алушта, 26 – 30 сентября 2016, С.427-432.
5. Березняк А.Ф., Гук В.Г., Печенкин И.В., Коньков Ю.В., Филаретов Г.А., Экспериментальные исследования и расчет СВЧ характеристик арсенид-галлиевых полевых транзисторов с барьером Шоттки // Вопросы радиоэлектроники, Серия: Общие вопросы радиоэлектроники, вып. 2, 1989, С.93-101. (РИНЦ)
6. Березняк А.Ф., Коротков А.С., Балашов Е.В. Трансформация синтеза фильтров частот в синтез твердотельных СВЧ переключателей // Наноиндустрия, 2017, Том 74 (Спецвыпуск), С. 427-432. (РИНЦ)
7. Березняк А.Ф. Мониторинг качества гетероперехода AlGaIn/GaN с помощью длинноканального полевого гетеротранзистора // Научно-технические ведомости СПбГПУ, Физико-математические науки, 2009, 1(73), С. 43-48. (РИНЦ)
8. Bereznyak A.F., Determination of parameters for technical requirements of technology monitoring, Proceedings of the VI international conference “Electronics and applied physics” October 20-23, 2010, Kyiv, Ukraine, p.85-86.
9. Березняк А.Ф., Использование тестовых структур при взаимодействии разработчика и изготовителя специализированных интегральных схем, 19-я Международная научно-техническая конференция «Современные телевидение и радиоэлектроника», 15-16 марта 2011, Москва, С.304-307.
10. Березняк А.Ф., Коротков А.С. Синтез и реализация монолитных интегральных схем СВЧ-переключателей на основе GaAs рНЕМТ-технологии // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление, 2019, Т. 12, № 4, С. 84–96. (ВАК, РИНЦ)
11. Балашов Е.В., Березняк А.Ф., Коротков А.С., Шубаров А.В. Кристалл Модулятор. Государственная регистрация топологии интегральной микросхемы № 2018630116, 16.07.2018, Бюл. № 7.