

Разработка СВЧ фазовращателя на основе технологии КНИ 0,18 мкм

А.Г. Ефимов, Д.А. Копцев, О.С. Кузнецова

АО «НИИМЭ»,

olkuznetsova@mikron.ru

Аннотация – Рассмотрены и определены основные конструктивные решения по реализации сверхвысокочастотных фазовращающих устройств. В данной статье представлены результаты моделирования разработанного дискретного фазовращателя. Осуществлено моделирование переключающего элемента схемы. Предложен алгоритм оптимизации его параметров. Моделирование проведено в среде Cadence Virtuoso. Актуальность работы заложена в решении проблемы импортозамещения компонентов для микросхем. Целью статьи является поиск конструкций, которые позволят реализовать 6-разрядный полупроводниковый фазовращатель для X-диапазона частот на основе отечественной технологии КНИ 0,18 мкм в ОАО «НИИМЭ» и Микрон. В работе обосновывается использование кремниевой КМОП КНИ технологии с топологическими нормами 0,18 мкм. Рассматриваются преимущества КНИ технологии для изготовления СВЧ ИС.

Ключевые слова – полупроводниковый фазовращатель, технология кремний-на-изоляторе, СВЧ диапазон, SPDT-переключатель.

I. ВВЕДЕНИЕ

Создание интегральных микросистем на одном кристалле подразумевает объединение различных функциональных блоков и/или устройств в рамках единого изделия. Реализация сложных микросхем и интегральных микросистем требует разработки сложной смешанной технологии, позволяющей одновременное (или последовательное) формирование биполярных, КМОП приборов, а также сенсоров физических величин. Наиболее адаптированными исходными материалами для реализации вышеуказанных задач являются многослойные структуры, получаемые сращиванием пластин, и, в частности, структуры кремний на изоляторе. Технологии получения подобных структур позволяют не только улучшить основные характеристики микросхем с уже известными схемотехническими решениями, но и значительно расширить перспективы приборных реализаций изделий микроэлектроники и микромеханики.

Спецификой разработки интегральных СВЧ устройств являются их высокий уровень сложности и дороговизна изготовления, в основном из-за использования элементной базы на GaAs и других

материалах группы АШВV, что существенно ограничивает применение таких систем в больших объемах и для потребительских приложений. В частности, при проектировании приемо-передающих модулей АФАР СВЧ диапазона необходимо обеспечивать работу элементов этих модулей на высоких частотах, что в свою очередь накладывает жесткие требования на характеристики элементной базы, которые определяются технологией изготовления [1].

II. ТЕХНОЛОГИЯ. ЧАСТОТНЫЙ ДИАПАЗОН

Известно, что переход от кремниевых пластин на структуры КНИ при производстве полупроводниковых приборов дает заметные преимущества.

ИС на основе КНИ более надежны, чем ИС на основе монокристаллического кремния, поскольку полная изоляция элементов ИС диэлектриком более совершенна, чем изоляция p-n переходами. Верхний предел диапазона рабочих температур ИС на основе КНИ существенно выше, чем аналогичный предел ИС на основе монокристаллического кремния. Это объясняется тем, что диэлектрическая изоляция более термостойка, чем изоляция p-n переходами.

Еще одним существенным достоинством КНИ-технологии является полная диэлектрическая изоляция N- и P-карманов, ввиду чего отсутствуют паразитные четырехслойные прпр структуры, а значит – возможность тиристорного защелкивания, свойственная объемной КМОП-технологии, в КНИ отсутствует [1].

КНИ-структуры нашли широкое применение в большинстве необходимых для практики сравнительно недорогих однокристалльных КНИ-микросистемах, ориентированных на различные применения в любых климатических условиях, относительно невысокую при этом стоимость, высокую эффективность и надежность работы [2].

В последнее время увеличение количества разрабатываемых радиоэлектронных изделий СВЧ-диапазона связано с широким развитием таких сфер применения радиоэлектроники, как космическая, спутниковая, сотовая связь, телекоммуникации. Необходимость создания новых СВЧ-радиоэлектронных средств стимулируется непрерывно

повышающимися требованиями к этим устройствам [3, 4].

Возможность изготавливать устройства на основе технологии кремний-на-изоляторе дает приоритет на дальнейшее развитие и проектирование в этом направлении.

Проектирование радиоэлектронной аппаратуры СВЧ диапазона имеет свою специфику, которая определяется главным образом её способностью получать высокие радиотехнические характеристики.

III. ФАЗОВРАЩАТЕЛЬ

Фазовращатели СВЧ наиболее употребительны в фазированных антенных решетках систем сверхбыстрой обработки информации, измерительной аппаратуре широкого назначения. Одними из основных параметров, характеризующих многодискретный фазовращатель, являются максимальный фазовый сдвиг и минимальный дискрет.

Анализ технических параметров фазовращателей, достигнутых на сегодняшний день, показывает, что основными тенденциями их развития являются: уменьшение массогабаритных показателей; расширение полосы рабочих частот; точность установки фазы; улучшение качества согласования; увеличение динамического диапазона установки фазы.

Основное назначение фазовращающего устройства – обеспечение сдвига фазы и амплитуды сигнала в диапазоне частот 8-12 ГГц с заданной разрядностью (6 бит).

На рис. 1 представлена общая архитектура дискретного фазовращателя. Фазовращатели строятся на комбинации пар фазовращающих ячеек (битов). Фазовращающие ячейки делятся на ФВ ячейки с опережением фазы (ФВЧ) и ФВ ячейки с запаздыванием фазы (ФНЧ). На рис. 1 показан общий сдвиг фазы, например, 180 – когда ФВЧ настроен на 90, а ФНЧ на -90, то при переключении между этими двумя путями сигнала фаза изменяется на 180. Преимуществом построения ФВ на фильтрах ВЧ и НЧ является малая зависимость сдвига фазы от частоты, что важно для широкополосных устройств, в отличие от ФВ на линиях, где фаза сильно зависит от частоты.

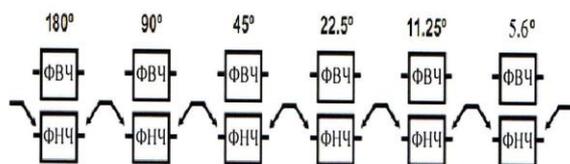


Рис. 1. Общая архитектура ФВ

Достоинство полупроводниковых дискретных фазовращателей заключается в том, что точность установки фазы определяется не уровнем управляющего напряжения, а только фактом его наличия. Этим самым снижаются требования к управляющему устройству.

В результате анализа имеющихся работ [5, 7, 8] по исследованию полупроводниковых фазовращателей были сформулированы требования на характеристики разрабатываемого устройства. Максимальный управляемый сдвиг должен составлять 360°, фазовое разрешение – 5,6°, фазовая ошибка – 5°, амплитудная ошибка – не более 5 дБ, полоса рабочих частот – 8-12 ГГц.

В связи со сложностью современных СВЧ-устройств и систем разработка возможна только с использованием средств автоматизированного проектирования, которые в основном ориентированы на задачи моделирования и конструкторского проектирования. Методы структурного синтеза разработаны только для ограниченного класса пассивных цепей на сосредоточенных и распределенных элементах. Для реализации задач синтеза общепринятой является интерактивная процедура проектирования СВЧ-устройств с использованием современных программных средств моделирования СВЧ-цепей. Процедура включает как использование специализированных программ, так и "ручные" методики проектирования. Широко используются упрощенные инженерные методики расчета. Как правило, первоначальное схемотехническое решение не удовлетворяет всем требованиям технического задания и требует "доработки" путем многократного моделирования изменения значений элементов и структуры (схемы) устройства. Уточнение величин элементов и длин согласующих шлейфов выполняется на основе метода параметрического синтеза с использованием алгоритмов нелинейной оптимизации. Однако применение параметрического синтеза не позволяет изменять структуру цепи [6].

Более точные результаты могут быть получены в результате электродинамического моделирования фазовращателей. В связи с большой трудоемкостью и обилием конструктивных параметров электродинамического моделирования целесообразно, чтобы ему предшествовало схемотехническое рассмотрение на основе эквивалентных схем, которое позволяет определить основные параметры и обладает большей физической наглядностью в плане влияния различных элементов на характеристики фазовращателей.

В процессе анализа определяются номинальные характеристики исследуемой конфигурации цепи для данного набора входных параметров.

Известны исследования характеристик SPDT ключа, реализованного на основе SiGe БикМОП технологии с проектными нормами 0,25 мкм [7].

Таким образом, необходимо подобрать ширины транзисторов переключателей для обеспечения минимальных потерь при сохранении приемлемой развязки.

IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯ. РЕЗУЛЬТАТЫ. АНАЛИЗ

В традиционной структуре ФВ используется полупроводниковый SPDT (single-pole double-throw) переключатель в качестве управляющего элемента. Он представляет собой переключатель каналов, выполненный по схеме “один в два” и предназначенный для контроля и направления потока СВЧ энергии из одной части схемы в другую посредством внешнего управляющего сигнала [8].

Электрическая схема ключа приведена на рис. 2.

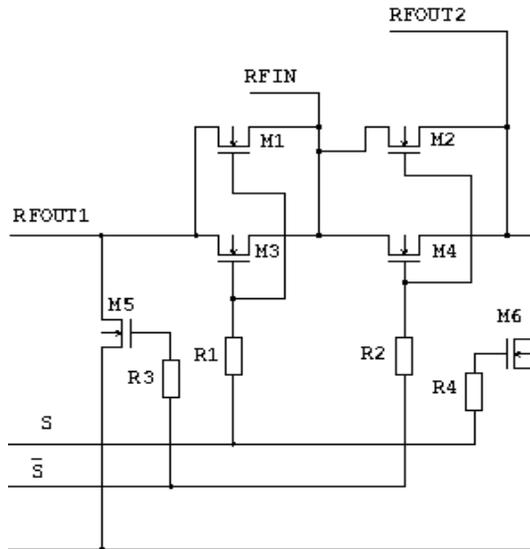


Рис. 2. Электрическая схема SPDT ключа

Радиочастотный вход схемы на рисунке обозначен как RFIN. Транзисторы M1-M4 используются в качестве коммутирующих элементов для выходов RFOUT1 и RFOUT2.

В данном случае отношение мощности сигнала на выходе RFOUT1 к мощности сигнала на входе RFIN будет определять коэффициент развязки каналов в закрытом состоянии переключателя, а отношение мощности сигнала на выходе RFOUT2 к мощности сигнала на входе RFIN — коэффициент потери (ослабления) сигнала в открытом состоянии переключателя.

Добавление шунтирующего транзистора более чем на 15 дБ увеличивает значение изоляции ключа по сравнению с ключом на одиночном транзисторе. Согласно расчетному моделированию выбором ширины шунтирующего транзистора можно улучшить значение изоляции ключа при незначительном воздействии на вносимые потери.

При создании современных многоканальных СВЧ устройств необходимо решать задачи коммутации сигналов СВЧ между каналами. Для решения подобных задач требуются СВЧ переключатели, позволяющие коммутировать СВЧ сигналы так, чтобы не происходило ограничений по рабочим частотам, скорости переключения, мощности коммутируемого

сигнала. Использование переключателей не должно приводить к росту потерь СВЧ сигнала в канале и ухудшению развязки между каналами. Для удовлетворения этих условий используются различные варианты схем переключателей [9].

В зависимости от состояния ключей СВЧ-волна может распространяться либо по более длинному пути, либо по более короткому, приобретая таким образом необходимый фазовый сдвиг.

Одной из важнейших характеристик является быстродействие ключа. При работе на максимальной частоте он по-прежнему должен проводить сигнал. Границы диапазона работы усилителя определяются частотами, при которых коэффициент усиления уменьшается на 3 дБ. В случае ключа этим критерием воспользоваться, к сожалению, нельзя, поскольку на полосу пропускания ключа влияют и другие параметры, в т.ч. характеристическое сопротивление, коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН), перекрестные помехи и изоляция [5].

Комбинирование последовательного и параллельного включения транзисторов позволяет реализовать сверхширокополосные фазовращатели.

С учетом требуемой изоляции для переключателя оптимальный размер будет при различных значениях ширин и количествах каналов транзисторов для заданной рабочей полосы частот.

Необходимой задачей было найти комплексное решение, используя оптимизацию ширин транзисторов. Оптимальным с точки зрения вносимых потерь и изоляции найдено следующее соотношение. Ширина проходных транзисторов – 150 мкм, число секций затворов (пальцев) – 30, ширина шунтирующих транзисторов – 100 мкм, число секций затворов – 20.

Результаты расчетного моделирования S-параметров оптимизированного SPDT переключателя представлены на рис. 3.

Оптимальным решением стало использование ширин транзисторов, при которых получились минимальные вносимые потери при закрытом ключе. На частоте 10 ГГц вносимые потери составили -2,15 дБ.

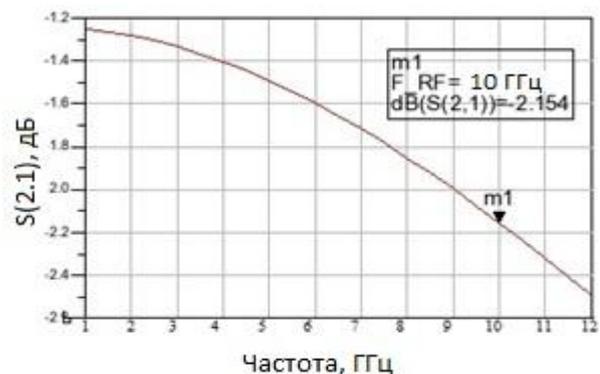


Рис. 3. Вносимые прямые потери SPDT переключателя

Основным малосигнальным параметром SPDT-ключа в закрытом состоянии является изоляция (потери запираения). Результаты моделирования приведены на рис. 4.

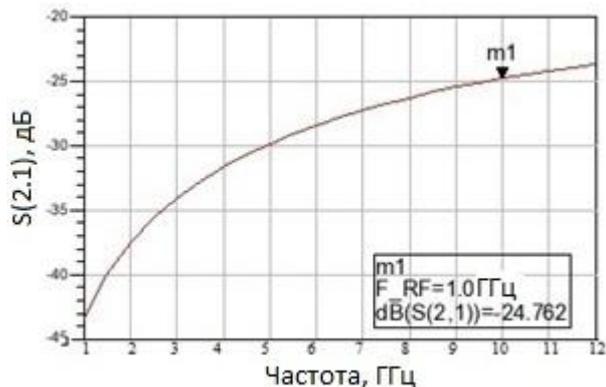


Рис. 4. Изоляция (потери запираения) SPDT переключателя

Полученные результаты вносимых потерь в SPDT-переключателе говорят о нецелесообразности использования традиционной схемы фазовращателя по данной технологии для частотного диапазона 8-12 ГГц. Помимо вносимых потерь на ФНЧ и ФВЧ большая часть потерь в схеме приходится на переключающие элементы. Общее число переключателей составляет $2k$, где k – количество бит. Наличие 12 последовательно включенных переключателей в схеме ведет к большим суммарным вносимым потерям около 26 дБ. Для схем L-диапазона эта схема более приемлема, т.к. вносимые потери на частоте 1-2 ГГц составляют меньше 1 дБ на один переключатель. Одним из способов решения проблемы может послужить применение промежуточного усилителя. Но в этом случае есть и свои недостатки, а именно – появление тока потребления, ограничение линейного участка и более сложное согласование всей схемы.

V. ОБЗОР КОНСТРУКЦИЙ ФАЗОВРАЩАТЕЛЕЙ. РАЗРАБОТКА ФАЗОВРАЩАТЕЛЯ

Приведенный метод решения задачи, рассмотренный в статье [10], является актуальным для данной работы. На рис. 5-7 приведены схемы фазовращателя для разных фазовых сдвигов.

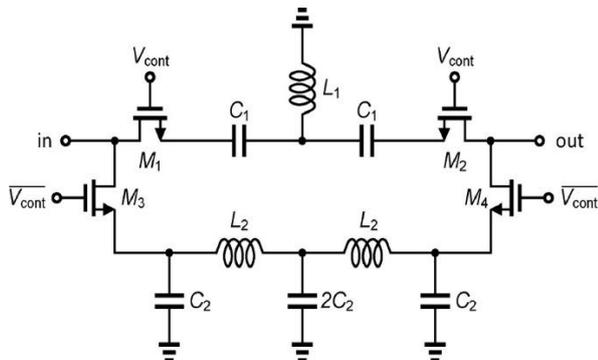


Рис. 5. Схема фазовращателя для 90° и 180°

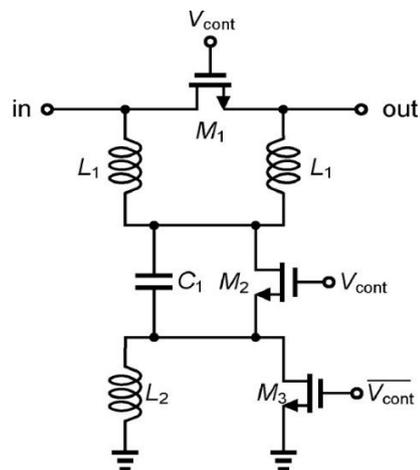


Рис. 6. Схема фазовращателя для 11.25°, 22.5° и 45°

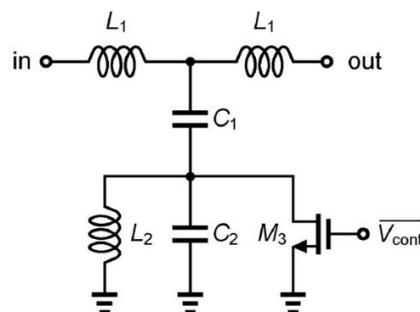


Рис. 7. Схема фазовращателя для 5.625°

В статье [10] рассмотрен способ реализации фазовращающего устройства, особенностью которого является объединение переключающих элементов и ФНЧ, ФВЧ в одно целое. В результате переключатель является частью фазовращателя, что в свою очередь позволяет снизить их количество во всей схеме и, следовательно, минимизировать уровень вносимых потерь.

На основе показанных схем на рис. 5-7 смоделирован дискретный фазовращатель. Результаты моделирования зависимости фазы и коэффициента передачи для разных состояний управляющих сигналов приведены на рис.8. Управляющий сигнал равен 0 В для состояния логического нуля и 1.8 В для состояния логической единицы.

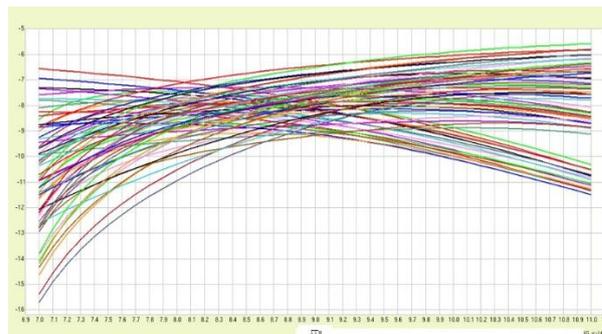


Рис. 8. Зависимость коэффициента передачи для разных фазосдвигающих состояний от частоты

На рис. 9 приведено изображение топологии полученного фазовращателя.

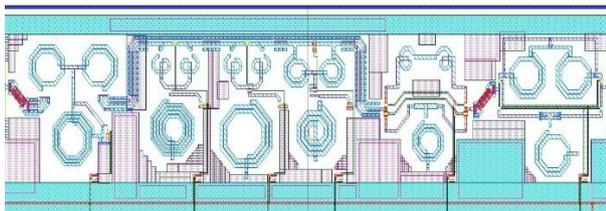


Рис. 9. Топология дискретного 6-битного фазовращателя

Размер топологии без учета контактных площадок – 2900 x 750 мкм².

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены варианты конструкций 6-битного полупроводникового дискретного фазовращателя. На основе проведенного анализа переключателя установлено, что классическая архитектура построения фазовращающего устройства неприемлема для использования в X-диапазоне.

В работе [10] предложена конструкция для реализации 6-разрядного фазовращателя. На основе приведенных схем разработан сверхвысокочастотный дискретный фазовращатель. Получены результаты, которые соответствуют предъявленным требованиям для этих устройств. Спроектированный фазовращатель передан на изготовление в ОАО «НИИМЭ и Микрон».

Для разработки 6-битного фазовращателя, представленного в данной работе, была использована САПР Virtuoso фирмы Cadence и САПР GoldenGate фирмы Agilent.

ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014 – 2020 годы» по соглашению № 14.579.21.0072 от 24 ноября

2014 года (уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI57914X0072).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Красников Г.Я., Нечипаренко А.П. Методика формирования полностью изолированных диэлектриком областей монокристаллического кремния// В кн.: Микро- и нанoeлектроника 1998. Всероссийская научно-техническая конференция. 1998. С. 47- 48.*1
- [2] Асеев А.Л., Попов В.П. Институт физики полупроводников. Перспективы применения структур кремний-на-изоляторе в микро-, нанoeлектронике и микросистемной технике.
- [3] Фуско В. СВЧ-цепи. Анализ и автоматизированное проектирование: Пер. с англ. – М.: Радио и связь ,1990
- [4] Панычев А.И. Учет поляризационных эффектов в канале системы WLAN// Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. - №5
- [5] Мусаева У. А. Автоматизированное проектирование СВЧ фазовращателя // Молодой ученый. — 2013. — №3. — С. 83-88.
- [6] Кисель Н.Н., Грищенко С.Г., Дерачиц Д.С. Визуальное проектирование СВЧ-устройств на примере фазовращателя. Известия ЮФУ. Технические науки.
- [7] Мухин И.И. Исследование и разработка методов проектирования полупроводниковых фазовращателей на основе SiGe БиКМОП технологии. Дис...канд. тех. наук: Москва, Зеленоград, 2012.
- [8] Елесин В.В., Назарова Г.Н. Методика оптимизации параметров SPDT-ключей для монокристаллических фазовращателей и аттенуаторов СВЧ диапазона // Электроника, микро- и нанoeлектроника. Сб. научн. трудов. - М.:МИФИ - 2008.
- [9] Щаврук Н.В. Проектирование и изготовление микроэлектромеханических переключателей на подложках GaAs для СВЧ диапазона. Дис... канд. тех. наук: Москва 2015.
- [10] Kiarash Gharibdoust, Naser Mousavi, *Student Member, IEEE*, Milad Kalantari, Mohsen Moezzi, *Student Member, IEEE*, and Ali Medi, *Member, IEEE*. A Fully Integrated 0.18- m CMOS Transceiver Chip for -Band Phased-Array Systems, 2012.

Development of microwave phase shifter based on SOI 0.18-micron technology

A.G. Efimov, D.A. Koptsev, O.S. Kuznetsova

JSC MERI, Moscow

olkuznetsova@mikron.ru

Keywords — semiconducting phase shifter, SOI technology, the microwave range, MFCC.

ABSTRACT

The basic design implementation decisions in phase-shifting microwave devices are considered. The article

presents the results of simulation of the digital phase shifter. The simulation of the switching element was performed in Cadence Virtuoso Environment, and the algorithm of the parameters optimization was proposed. Relevance of the work lies in solving the problem of substitution of the foreign components for chips. The aim of the article is to find such designs that will realize the 6-

bit semiconductor phase shifter for X-band frequency based on domestic 0.18 micron technology in JSC "MERI" and Micron. The paper substantiates the use of the silicon CMOS SOI technology with topological 0.18 microns standards. The advantages of SOI technology for manufacturing microwave IC are discussed.

REFERENCES

- [1] Krasnikov G.Y, Nechiporenko A.P Methods of forming dielectric regions fully isolated single-crystal silicon // In the book.: Micro- and nanoelectronics, 1998. All-Russian Scientific and Technical Conference. 1998, pp 47- 48.*1
- [2] Aseev A.L, Popov V.P Institute of Semiconductor Physics. Prospects for the use of silicon-on-insulator in the micro-nanoelectronics and microsystems technology.
- [3] Fusco V. Microwave circuit. The analysis and computer-aided design: Per. from English. — M.: Radio and Communications, 1990.
- [4] Panychev A.I The account polarization effects in the channel WLAN // Proceedings of the SFU system. Technical science. - 2013. - №5
- [5] Musayev W.A Computer-aided design of microwave phase shifter // Young scientist. — 2013. — №3. - S. 83-88.
- [6] Kissel N.N, Grishchenko S.G Derachits D.S The visual design of microwave devices on the example of the phase shifter. Proceedings of SFU. Technical science.
- [7] Mukhin I.I Research and development of methods for the design of semiconductor phase shifters based on SiGe BiCMOS technology. dis... cand. those. Sciences: Moscow, Zelenograd, 2012.
- [8] Elesin V.V, Nazarov G.N. The technique of optimization SPDT-key parameter for the solid phase shifters and attenuators microwave // Electronics, micro- and nanoelectronics.. - kand. tekh. nauk Moscow: Moscow Engineering Physics Institute - 2008.
- [9] Gavruk N.V Designing and manufacturing of MEMS switches on GaAs substrates for microwave. Dis... kand. tekh. nauk: Moscow 2015.
- [10] Kiarash Gharibdoust, Naser Mousavi, *Student Member, IEEE*, Milad Kalantari, Mohsen Moezzi, *Student Member, IEEE*, and Ali Medi, *Member, IEEE*. A Fully Integrated 0.18- m CMOS Transceiver Chip for -Band Phased-Array Systems, 2012.