

На правах рукописи

Замешаева Евгения Юрьевна

Исследование и разработка малогабаритных СВЧ-фазовращателей в интегральном исполнении с применением прогрессивных гибридных технологий массового производства

05.12.07 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2012

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина)

Научный руководитель

доктор физико-математических наук, профессор, Вендик Ирина Борисовна

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор, Козырев Андрей Борисович, Санкт-Петербургский государственный университет, профессор кафедры физической электроники и технологий

Кандидат технических наук, Плескачëв Владимир Владимирович, ООО «Симикон», инженер

Ведущая организация – ЗАО «Светлана-Электронприбор»

Защита состоится 16 мая 2012 года в ____ на заседании диссертационного совета Д 212.238.03 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина).

Автореферат разослан __ апреля 2012 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета

Баруздин С.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. СВЧ фазовращатель (ФВ) – один из основных элементов фазированных антенных решеток. В связи с ростом требований к устройствам сверхвысокочастотной (СВЧ) микроэлектроники, растут и требования, предъявляемые к СВЧ ФВ. Для успешной конкуренции на рынке, современные устройства СВЧ микроэлектроники должны удовлетворять требованиям, к которым, в первую очередь, относятся малая величина ошибки фазового сдвига и малый уровень вносимых потерь в достаточно широком диапазоне рабочих частот (более 10%), а также малые габариты устройства. Кроме того, устройства должны быть согласованными по входу и выходу во всем рабочем диапазоне частот. Для достижения этих требований и улучшения характеристик новых разрабатываемых устройств требуются все более новые и нестандартные подходы к методике проектирования ФВ различных типов и конструкций.

Проблема проектирования СВЧ ФВ хорошо освещена в литературе: на протяжении многих десятилетий специалисты разрабатывали новые конструктивные и технологические решения для реализации СВЧ ФВ. Повышенный интерес к метаматериалам, появившийся в последнее десятилетие, открыл новые возможности для проектирования СВЧ ФВ. На основе одномерных метаматериалов разрабатываются дискретные ФВ на переключаемых каналах, выполненных в виде линий передачи с положительной и отрицательной дисперсией, что является альтернативой ФВ на переключаемых высокочастотной и низкочастотной цепях или линиях передачи различной электрической длины, а также аналоговые ФВ на линиях передачи, имеющих управляемую дисперсию. Данный подход позволяет разрабатывать ФВ с улучшенными характеристиками, удовлетворяющими выше перечисленным требованиям.

Другой важной и недостаточно исследованной проблемой является разработка дискретно-аналоговых широкополосных ФВ отражательного типа, состоящих из управляющего элемента и трансформирующей цепи. В настоящей работе представлена методика проектирования дискретно-аналогового ФВ отражательного типа, удовлетворяющего требованиям минимума уровня потерь на отражение, определяемого параметрами управляющего элемента. Такой ФВ обладает малыми потерями на отражение в достаточно широкой полосе частот, определяемой допустимой ошибкой установки фазового сдвига.

Таким образом, **актуальность работы** определяется: 1) разработкой новой методики проектирования дискретно-аналоговых ФВ отражательного типа, основанной на использовании параметров управляющего элемента в режиме устройства с двумя временными состояниями; 2) применением современного подхода к использованию метаматериалов для реализации аналоговых и дискретных ФВ; 3) возможностью использования современных технологий, обеспечивающих массовый выпуск устройств.

Все устройства, представленные в работе, обладают малыми габаритами, малой величиной ошибки установки фазового сдвига и малым уровнем потерь, то есть удовлетворяют современным жестким требованиям, предъявляемым к СВЧ устройствам.

Цель диссертационной работы – моделирование характеристик широкополосных СВЧ ФВ, работающих в аналоговом и дискретном режимах, и разработка методики их проектирования. Исследование и разработка миниатюрных аналоговых и дискретных СВЧ ФВ, выполняемых с применением гибридных технологий.

Поставленная цель была достигнута за счет решения следующих задач:

- 1) Разработка методики проектирования аналоговых ФВ отражательного типа с применением управляемых конденсаторов в качестве управляющих элементов.
- 2) Исследование влияния параметров управляющих элементов на характеристики аналоговых ФВ;
- 3) Исследование возможности применения композитной линии передачи с управляемой дисперсией для реализации аналоговых ФВ;
- 4) Применение методики проектирования дискретных ФВ на переключаемых шлейфах и линиях передачи с положительной и отрицательной дисперсией.

Основные методы исследования;

- а) Теоретические: методы теории электрических цепей, численные методы электродинамического моделирования;
- б) Экспериментальные: измерения зависимости параметров матрицы рассеяния от частоты – модуля и фазы коэффициента отражения и передачи.

Научные положения, выносимые на защиту

- 1) Проходные ФВ на основе гибридных устройств, нагруженных на ФВ отражательного типа, удовлетворяющие условиям оптимального синтеза для фиксированной частоты, могут использоваться в аналоговом режиме в

полосе частот, ограниченной заданным уровнем ОУФС, при этом заданный уровень коэффициента отражения обеспечивается в более широкой полосе частот.

- 2) Наименьшая модуляция потерь на отражение в ФВ, реализующем сдвиг фазы $0^\circ - 180^\circ$ в аналоговом режиме достигается при синтезе ФВ на заданный фазовый сдвиг $\Delta\varphi_0 = 180^\circ$. Значение максимального уровня потерь на отражение зависит от максимального значения емкости УЭ.
- 3) В аналоговом ФВ на основе композитной линии передачи с управляемой дисперсией минимальное число элементарных ячеек, необходимое для реализации заданного значения фазового сдвига, определяется фазовым сдвигом, реализуемым в одной ячейке при изменении емкости в пределах, допускаемых рассогласованием; максимальное число используемых элементарных ячеек определяется допустимым уровнем вносимых потерь.
- 4) Использование переключаемых линий передачи с положительной и отрицательной дисперсией позволяет существенно расширить рабочую полосу частот дискретного ФВ по сравнению с ФВ на традиционных переключаемых линиях передачи.

Научная новизна работы

- 1) Предложено и обосновано применение методики проектирования дискретных ФВ отражательного типа к аналоговым отражательным ФВ. Такие ФВ имеют равные потери на отражение для двух состояний управляющих элементов, соответствующих минимальному и максимальному значениям управляемой емкости, а также обеспечивают фазовый сдвиг в интервале от 0° до заданного значения $\leq 180^\circ$. Проведено исследование трансформирующих цепей в составе ФВ отражательного типа с целью выявления конструкции, обладающей наилучшими характеристиками по совокупности различных параметров в полосе частот.
- 2) Предложено использование композитной линии передачи с управляемой дисперсией для реализации аналогово-дискретного ФВ проходного типа.
- 3) Продемонстрировано, что применение переключаемых линий передачи с положительной и отрицательной дисперсией позволяет разработать широкополосные ФВ с малой величиной ошибки установки фазового сдвига.
- 4) Применение гибридных технологий массового производства (многослойной технологии на основе керамики с низкой температурой обжига, технологии печатных плат с использованием компонентов

поверхностного монтажа) позволяет реализовывать миниатюрные устройства, предназначенные для массового производства.

Степень обоснованности и достоверности полученных результатов.

Полученные теоретические результаты не противоречат ранее полученным и описанным в литературе результатам. Результаты электродинамического моделирования и экспериментального исследования тестовых образцов подтверждают достоверность результатов, полученных теоретически.

Практическая значимость результатов работы

- 1) Разработанная методика проектирования ФВ отражательного типа может применяться для синтеза ФВ по известным параметрам управляющего элемента и требуемому значению фазового сдвига, реализуемого устройством. Методика позволяет проектировать как аналоговые, так и дискретные ФВ.
- 2) Методика синтеза аналогового ФВ на композитной линии передачи позволяет разрабатывать широкополосные ФВ с малой ошибкой установки фазового сдвига в широкой полосе частот для любых значений фазового сдвига.
- 3) Применение линий передачи с положительной и отрицательной дисперсией в качестве каналов дискретного ФВ на переключаемых каналах позволяет реализовать дискретные широкополосные ФВ с малой ошибкой установки фазового сдвига.
- 4) Реализация указанных типов ФВ с применением гибридных технологий массового производства позволяет изготавливать миниатюрные устройства для массового производства.

Реализация и внедрение результатов исследования.

Полученные в рамках работы результаты могут быть использованы в современной радиоэлектронной промышленности.

Апробация

Результаты работы были представлены и обсуждены специалистами в области СВЧ электроники на конференциях различного уровня.

Международные конференции: 26th Progress In Electromagnetic Research Symposium (август 2009г., Москва, Россия), 5th European Conference on Antennas and Propagation (апрель 2011г., Рим, Италия), 5th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics (октябрь 2011г., Барселона, Испания), 15th Anniversary International Student Seminar on Microwave and Optical Application of novel physical phenomena (май 2008г., Санкт-Петербург, Россия), 17th International Student Seminar on Microwave and optical

applications of novel phenomena and technologies (июнь 2010г., Ильменау, Германия).

Всероссийские конференции: Всероссийская конференция и научная школа молодых ученых «Новые материалы и нанотехнологии в электронике СВЧ» (ноябрь 2010г., Санкт-Петербург, Россия).

Прочие конференции и семинары: Научно-технический семинар «Инновационные разработки в технике и электронике СВЧ» в рамках 61^{ой}, 62^{ой} и 63^{ей} научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» (2008, 2009 и 2010гг., Санкт-Петербург, Россия).

Публикации

Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 12 статьях и докладах на конференциях разного уровня, среди которых 2 публикации в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК. Доклады доложены и получили одобрение на 10 международных, всероссийских и межвузовских научно-практических конференциях, перечисленных в конце автореферата

Структура и объем диссертации: Диссертация состоит из введения, 5 глав с выводами, заключения. Работа изложена на 157 страницах машинописного текста, включает 152 рисунка, 12 таблиц, 3 приложения и список литературы из 71 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, научная новизна и практическая ценность полученных результатов, а также сформулированы научные положения, выносимые на защиту.

Глава 1 «СВЧ фазовращатели: принципы построения, конструкции и характеристики» посвящена обзору литературы по теме работы.

Первый параграф посвящен классификации управляющих элементов (УЭ). УЭ является неотъемлемой частью конструкции любого ФВ. Типа ФВ (аналоговый или дискретный) определяется типом УЭ. Обсуждается интегральная характеристика, позволяющая оценить и сравнить УЭ различных типов – «фактор коммутационного качества УЭ» (ФКК). ФКК определяется эффективностью перестройки емкости и величиной потерь в УЭ. Также в

данном параграфе введен параметр качества ФВ, рассчитываемый как отношение фазового сдвига устройства к максимальной величине вносимых потерь. Предельное значение параметра связано с ФКК УЭ. Во втором параграфе главы 1 приведена классификация типов и конструкций ФВ. Рассматриваются конструкции дискретных ФВ: на переключаемых каналах различных видов, проходные шлейфные ФВ, проходные ФВ на основе гибридных устройств, нагруженных на ФВ отражательного типа различных конструкций. По каждому конструктивному типу ФВ обсуждаются достоинства, недостатки и возможные конфигурации. Рассматриваются ФВ аналогового типа. Большинство описываемых конструкций ФВ дискретного и аналогового типа идентичны, ФВ различаются лишь типом УЭ.

В заключении главы 1 сформулированы основные выводы и задачи исследований в рамках диссертационной работы.

Глава 2 «Синтез фазовращателей отражательного типа на основе параметров управляющих элементов» посвящена описанию методики проектирования ФВ отражательного типа по параметрам УЭ. Данная методика синтеза для дискретного ФВ отражательного типа по параметрам УЭ в двух состояниях в одной частотной точке была впервые предложена в [1] для ФВ на $p-i-n$ -диодах и использована в [2] для ФВ, управляемого $S-N$ переключателем на основе высокотемпературного сверхпроводника. В настоящей работе рассматривается применение этой методики к разработке ФВ, функционирующего в аналоговом режиме (управление переменным емкостным элементом – варикапом).

Эквивалентная схема ФВ отражательного типа представлена на рисунке 1. Взаимный реактивный четырехполюсник является трансформирующей цепью (ТЦ), предназначенной для трансформации сопротивления нагрузки (УЭ) Z_i в сопротивление входной цепи Z_0 . ТЦ описывается $ABCD$ -матрицей.

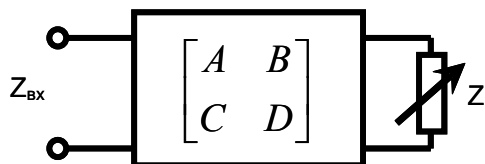


Рисунок 1. Эквивалентная схема ФВ отражательного типа.

Для синтеза дискретного ФВ отражательного типа с минимальными потерями на заданной рабочей частоте f_0 необходимо выполнение двух условий: ФВ должен обладать одинаковой величиной потерь на отражение для

двух состояний УЭ, разность фаз коэффициентов отражения в двух состояниях должна равняться заданному значению $\Delta\varphi_0$.

$$|\Gamma_1|^2 = |\Gamma_2|^2, \quad (1)$$

$$\Delta\varphi_0 = \Delta\varphi(f_0). \quad (2)$$

Для комплексного сопротивления нагрузки z_i ($i = 1, 2$), нормированного к сопротивлению входной цепи Z_0 , отношение коэффициентов отражения в двух состояниях с учетом условий (1) и (2) определяется выражением:

$$\frac{\Gamma_2}{\Gamma_1} = \frac{a \cdot z_1 z_2 - b - jc(z_1 + z_2) + (z_1 + z_2)}{a \cdot z_1 z_2 - b - jc(z_1 + z_2) - (z_1 + z_2)} = e^{j \cdot \Delta\varphi}, \quad (3)$$

где a , b и c - безразмерные коэффициенты, определяемые параметров элементами матрицы передачи:

$$a = A^2 + Z_0^2 C^2$$

$$b = (B/Z_0)^2 + D^2$$

$$c = Z_0 CD - AB/Z_0$$

От системы в двух временных состояниях перейдем к схеме, содержащей импеданс эквивалентной нагрузки $Z_{\text{эКВ}}$ с одним временным состоянием. Тогда в схеме, представленной на рисунке 1 $Z_i = Z_{\text{эКВ}}$, $Z_{\text{вХ}} = Z_0$. Выразив для приведенной на рисунке 1 схемы коэффициент отражения по входу в двух состояниях нагрузки (УЭ) через параметры $ABCD$ -матрицы реактивного четырехполюсника и импеданса УЭ с учетом соотношений (1) и (2), найдем импеданс эквивалентной нагрузки схемы с одним временным состоянием:

$$Z_{\text{эКВ}} = \frac{jB - DZ_0}{jCZ_0 - A} = \frac{1 + jc}{a} \quad (4)$$

Проведен анализ для УЭ - варикапов, характеризующихся переменным значением реактивного сопротивления x_i , определяемым приложенным напряжением смещения. Ограничим набор дискретных значений фазового сдвига значениями $\Delta\varphi \leq 180^\circ$. Для $0^\circ \leq \Delta\varphi/2 < 90^\circ$ вспомогательные коэффициенты c и a рассчитываются по формулам:

$$c = \frac{(x_2^2 - x_1^2) \pm \sqrt{(x_2^2 - x_1^2)^2 + (x_1 + x_2)^2 [4r^2 + (x_2 - x_1)^2] \operatorname{tg}^2 \frac{\Delta\varphi}{2}}}{[4r^2 + (x_2 - x_1)^2] \operatorname{tg} \frac{\Delta\varphi}{2}}, \quad (5)$$

$$a = 2 \cdot \frac{(x_2 - x_1) \pm \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + [4r^2 + (x_2 - x_1)^2] \operatorname{tg}^2 \frac{\Delta\varphi}{2}}}{[4r^2 + (x_2 - x_1)^2] \operatorname{tg} \frac{\Delta\varphi}{2}}. \quad (6)$$

В частном случае для $\Delta\varphi/2 = 90^\circ$:

$$c = \frac{x_1 + x_2}{\sqrt{4r^2 + (x_2 - x_1)^2}}, \quad (7)$$

$$a = \frac{2}{\sqrt{4r^2 + (x_2 - x_1)^2}}. \quad (8)$$

Для обоих случаев

$$b = \frac{(1 + c^2) \cdot (x_1 + x_2)}{2c} \quad (9)$$

В расчете вспомогательных коэффициентов было принято, что значение активного сопротивления r_i неизменно во всех состояниях.

По найденным значениям коэффициентов a , b и c , выраженным через параметры эквивалентной схемы УЭ в двух состояниях, с помощью выражения (4) определяется величина импеданса эквивалентной нагрузки $Z_{\text{ЭКВ}}$. Реактивный четырехполюсник, описанный матрицей передачи с известными параметрами, имеет входное сопротивление $Z_0 = 50$ Ом на одном входе и эквивалентную нагрузку $Z_{\text{ЭКВ}}$ на другом. При этом реактивный четырехполюсник представляет собой цепь, трансформирующую входное сопротивление Z_0 в эквивалентное сопротивление $Z_{\text{ЭКВ}}$.

В главе 3 «Синтез трансформирующих цепей. Анализ характеристик СВЧ фазовращателей отражательного типа» рассмотрены методы трансформации сопротивления эквивалентной нагрузки $Z_{\text{ЭКВ}}$ в сопротивление входной цепи Z_0 . Детально рассматриваются 2 метода: метод эквивалентной добротности [3] и метод широкополосного согласования двухэлементных комплексных нагрузок с помощью полосно-пропускающих цепей [4]. Первый метод позволяет

реализовать компактную ТЦ, реализованную с меньшим числом реактивных элементов. Анализ конфигураций ТЦ показал, различные конфигурации двухэлементной ТЦ, реализованные для эквивалентной нагрузки последовательного и параллельного типа, а также характеристики ФВ на их основе. Установлено, что ширина рабочей полосы частот, определяемая по уровню модуля коэффициента отражения от эквивалентной нагрузки, значительно превышает ширину рабочей полосы частот, определяемую по уровню ошибки установки фазового сдвига (ОУФС), определяемую как разность фаз коэффициента отражения на некоторой частоте и центральной частоте рабочего диапазона. Найдены ограничения, накладываемые на величину емкости УЭ, которую необходимо использовать для реализации ФВ с минимальным уровнем ОУФС в выбранной рабочей полосе частот. Введем понятие «заданной управляемости УЭ» n_0 как отношение емкостей, при которых фазовый сдвиг равен значению, на которое выполняется синтез ФВ ($\Delta\varphi = \Delta\varphi_0$);

$$n_0 = C_{\max} / C_{\min} \quad (10)$$

С ростом заданной управляемости варикапа n_0 рабочая полоса частот по уровню коэффициента отражения от эквивалентной нагрузки увеличивается. С ростом максимальной емкости варикапа C_{\max} , значение которой задается на начальном этапе синтеза, в ФВ возрастают потери на отражение. Для каждого типа ТЦ, описываемой соответствующей эквивалентной схемой, существует ограниченный интервал значений емкости УЭ, при использовании которых обеспечивается реализация ТЦ выбранного типа. На основании проведенного анализа были выявлены эквивалентные схемы ТЦ, рекомендуемые для ФВ отражательного типа, синтезированные для эквивалентной нагрузки параллельного и последовательного типов $Z_{\text{ЭКВ}}$ (импеданс эквивалентной нагрузки представлен в виде вещественной $R_{\text{ЭКВ}}$ и мнимой $X_{\text{ЭКВ}}$ частей) представлены на рисунках 2а и 2б соответственно.

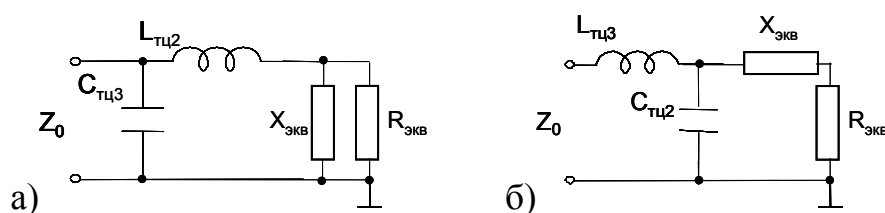


Рисунок 2. Эквивалентные схемы ТЦ для эквивалентной нагрузки $Z_{\text{ЭКВ}}$ параллельного (а) и последовательного (б) типа.

В таблице 1 приведены ограничения на значения емкости УЭ для выбранных схем при различных значениях коэффициента перекрытия по емкости и фазового сдвига, на которые выполняется синтез ФВ.

Таблица 1

Ограничения на значения емкости УЭ для различных схем.

$\Delta\varphi_0$		180°				135°			90°
n_0		2	3	4	5	2	3	4	2
C_{\max} , ПФ	Рис. 2а	>1,55	>3,15	>4,7	>6,3	>2,35	>4,75	>7,1	>3,8
	Рис. 2б	<1,65	<3,3	<4,9	<6,6	<2,4	<4,85	<7,25	<3,9

Основной вывод по разделу 3.1: при необходимости синтезировать широкополосный ФВ с минимальным уровнем модуляции потерь на отражение для синтеза следует выбрать заданную величину фазового сдвига $\Delta\varphi_0 = 180^\circ$ при максимально возможном коэффициенте перекрытия по емкости. При синтезе ФВ с минимальным уровнем ОУФС в полосе частот следует выбрать заданную величину фазового сдвига $\Delta\varphi_0 = 90^\circ$. При $\Delta\varphi_0 < 180$ выбранное значение заданного фазового сдвига обеспечивается при заданной управляемости n_0 . Для реализации фазового сдвига $\Delta\varphi = 180$ в УЭ должна обеспечиваться возможность дальнейшего управления емкостью ($n > n_0$).

В параграфе 2 главы 3 продемонстрирован результат синтеза ФВ с ТЦ, синтезированной по методу эквивалентной добротности для $\Delta\varphi_0 = 180^\circ$ и $n_0 = 6$ (рисунок 3а). ФВ проходного типа реализован в виде 3-дБ направленного ответвителя [5], нагруженного на два идентичных ФВ отражательного типа. Для синтеза был использован варикап SMV39003, обладающий малыми размерами и большим коэффициентом перекрытия по емкости [6]. Устройство выполнено по технологии керамики низкой температуры обжига в 7 слоях керамики DuPont Green Tape 951 ($\epsilon_r = 7,8$, $\text{tg}\delta = 0,002$) толщиной 95 мкм каждый. ТЦ реализована на основе высокодобротных компонентов поверхностного монтажа. В соответствии с результатами электродинамического моделирования характеристик устройства (рисунок 3б) получено: в рабочей полосе частот по уровню: 2,85 – 3,2 ГГц (12%) ОУФС не превышает $\pm 10^\circ$, уровень вносимых потерь менее 1,6 дБ, уровень коэффициента отражения ниже -18 дБ; габариты устройства $8 \times 4 \times 1,2$ мм³. Также был реализован $0^\circ - 360^\circ$ ФВ, состоящий из двух секций $0^\circ - 180^\circ$ ФВ, одна из

которых функционирует в аналоговом режиме, а другая - дискретно обеспечивает фазовый сдвиг 180° .

Третий параграф главы 3 посвящен синтезу ТЦ по методу полосно-пропускающих цепей [4]. Данный метод позволяет реализовать согласование в полосе частот заданной ширины, однако, как и в предыдущем случае, ширина рабочей полосы частот по уровню ОУФС оказывается существенно меньше. Для расширения рабочей полосы частот ФВ необходимо производить синтез ТЦ в более широкой полосе частот по согласованию. Для эквивалентной нагрузки, рассчитанной для варикапа [6], была синтезирована эквивалентная схема ФВ и топология (рисунок 4), описанные в четвертом параграфе 3 главы. Топология устройства разработана с использованием аналогичной технологии.

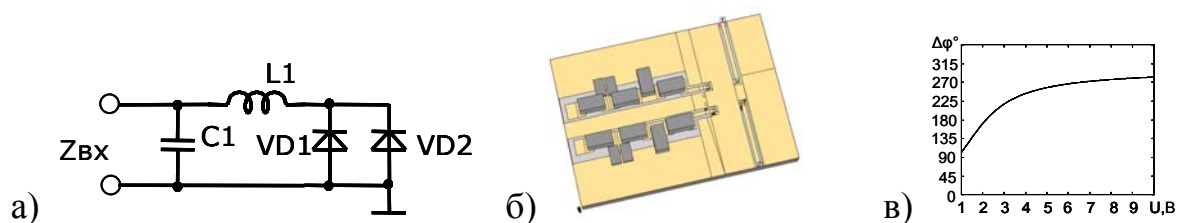


Рис. 3. Эквивалентная схема ФВ отражательного типа (а), топология ФВ проходного типа (б), характеристика ФВ в аналоговом режиме (в).

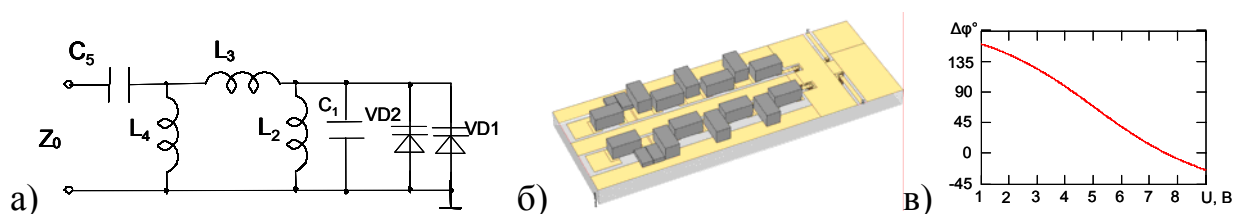


Рисунок 4. Эквивалентная схема ФВ отражательного типа (а), топология ФВ проходного типа (б), характеристика ФВ в аналоговом режиме (в).

В результате электродинамического моделирования характеристик устройства (рисунок 4б) получены следующие характеристики: рабочая полоса частот по уровню ОУФС $\pm 10^\circ$ составляет 2,85 – 3,2 ГГц (12%), уровень вносимых потерь не превышает 2,6 дБ, уровень коэффициента отражения в рабочей полосе частот менее -14 дБ. Габариты ФВ: $11 \times 4 \times 1,2 \text{ мм}^3$

В выводах к главе 3 сформулированы рекомендации к выбору параметров УЭ (величина емкости и коэффициента перекрытия по емкости) и величины фазового сдвига, необходимых для синтеза ФВ. Синтез ФВ, оптимального одновременно по таким критериям как: максимальная ширина рабочей полосы частот по согласованию, по уровню ОУФС, минимальная модуляция потерь, - невозможен.

В главе 4 диссертации "Методика проектирования аналоговых СВЧ фазовращателей проходного типа на основе композитной линии передачи" рассматривается аналоговый ФВ проходного типа, выполненный в виде каскадного соединения ячеек композитной линии передачи с управляемой дисперсией. В главе вводится понятие «одномерных метаматериалов» как отрезков искусственных линий передачи с отрицательной дисперсией, характеризующихся противоположным направлением векторов фазовой и групповой скоростей электромагнитной волны. Описанию таких линий передачи и методов расчета их параметров посвящен первый параграф главы 4. Ячейка композитной линии получается при каскадном включении элементарной ячейки линии передачи с положительной и отрицательной дисперсией (рисунок 5). В низкочастотной области такая ячейка обладает свойствами линий передачи с отрицательной дисперсией, а в высокочастотной – свойствами линии передачи с положительной дисперсией. Вторым параграфом главы 4 диссертации посвящен описанию управляемой композитной линии передачи. На примере одной Т-образной ячейки, содержащей управляемые конденсаторы, анализируется влияние коэффициента перекрытия по емкости на такие характеристики ячейки как импеданс, коэффициент отражения, уровень вносимых потерь и величина фазового набега. Рассматриваются два способа описания величины фазового набега в ячейке композитной линии: через параметры матрицы рассеяния и через электрические длины линий передачи с положительной и отрицательной дисперсией. Результаты, полученные при использовании обоих методов, идентичны.

В третьем параграфе главы 4 описывается СВЧ ФВ, функционирующий в аналоговом и дискретном режимах (в зависимости от типа управляющего воздействия) и обеспечивающий сдвиг фазы в диапазоне $0^\circ - 180^\circ$. На основании анализа, приведенного во втором параграфе, было установлено минимальное число ячеек, необходимое для реализации ФВ, обеспечивающего требуемый сдвиг фазы и необходимы уровень согласования. Принимая во внимание требования миниатюризации устройства, минимизации вносимых потерь и согласования в широкой полосе частот, были рассчитаны характеристики и определено оптимальное число элементарных ячеек композитной линии передачи в составе ФВ. В четвертом параграфе 4 главы приведен пример реализации аналогово-дискретного ФВ, выполненного на основе 4 ячеек композитной линии передачи. Представлены характеристики (рисунок 6), полученные в результате электродинамического моделирования устройства. Для центральной частоты 2,7 ГГц рабочего диапазона частот,

имеющего относительную полосу 25%, получена зависимость фазового сдвига от частоты. ОУФС не превышает $\pm 10^\circ$ для фазового сдвига 180° , уровень вносимых потерь менее 4 дБ, уровень коэффициента отражения не превышает -15 дБ. Устройство синхронно управляется варикапами [6], коэффициент перекрытия по емкости которых не превышает 2,2, что соответствует управляющему напряжению 1 - 3 В.

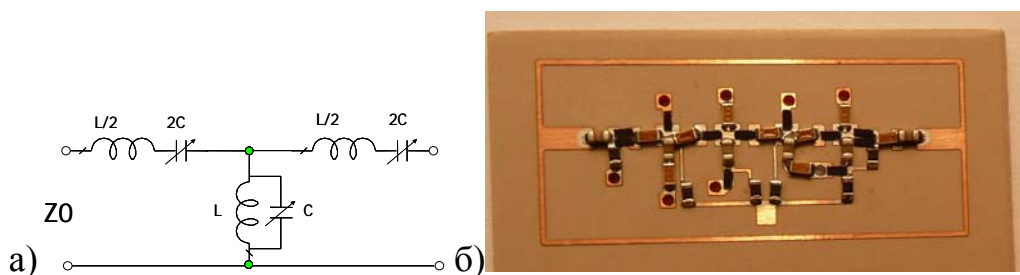


Рисунок 5. - Эквивалентная схема элементарной ячейки композитной линии (а), фотография ФВ (б).

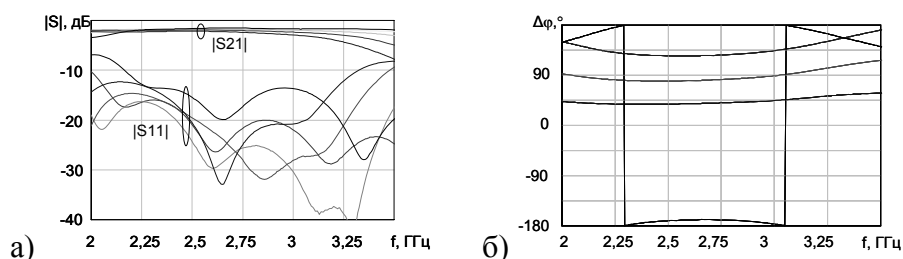


Рисунок 6. – Характеристики ФВ в дискретном режиме для состояний, отличающихся по фазовому сдвигу на 45° : АЧХ (а), ФЧХ (б).

В главе 5 "Многоразрядные дискретный СВЧ фазовращатели на переключаемых каналах" продемонстрированы 2 многоразрядных дискретных ФВ проходного типа, выполненных на основе переключаемых каналов, состоящих из отрезков линий передачи с положительной и отрицательной дисперсией. Переключение каналов осуществляется корпусированными транзисторными переключателями 1:2. В первом параграфе главы 5 демонстрируется 6-разрядный ФВ, выполненный по технологии печатных плат с компонентами поверхностного монтажа типоразмера 0402 на подложке Rogers RO3210 (рисунок 7а). Разряды шестиразрядного ФВ выполнены с применением двух типов схем: старшие разряды (45° , 90° , 180°) выполнены по схеме переключаемых каналов, реализованных на основе отрезков ЛОД и ЛПД, младшие разряды устройств ($5,6^\circ$, $11,25^\circ$, $22,5^\circ$) выполнены на основе переключаемых шлейфов. Комбинирование двух типов схем позволило

реализовать ФВ с невысоким средним уровнем вносимых потерь (6 дБ) и ОУФС менее 6° (рисунок 7б) в широкой полосе частот (5 - 6 ГГц). Габариты устройства $27 \times 16 \text{ мм}^2$.

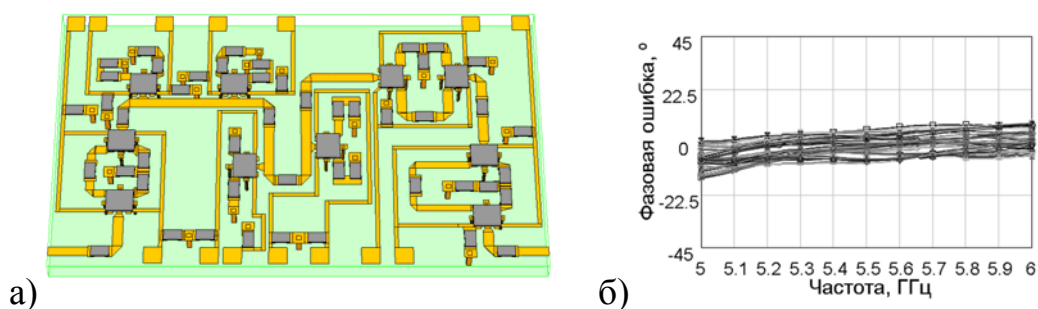


Рисунок 7. Топология (а) и ОУФС (б) дискретного шестиразрядного ФВ.

Трехразрядный ФВ на основе переключаемых отрезков ЛОД и ЛПД выполнен по планарной технологии толсто пленочных ГИС СВЧ на поликоровой подложке (рисунок 8а). Использование встречно-штыревых емкостей, спиральных двухслойных индуктивностей и линии передачи, представленной на рисунке 8а, позволило реализовать широкополосное устройство с малым уровнем вносимых потерь. Характеристики устройства приведены на рисунках 8б и 8в, габариты подложки составляют: $50 \times 30 \text{ мм}^2$.

В Заключении сформулированы основные выводы по диссертационной работе.

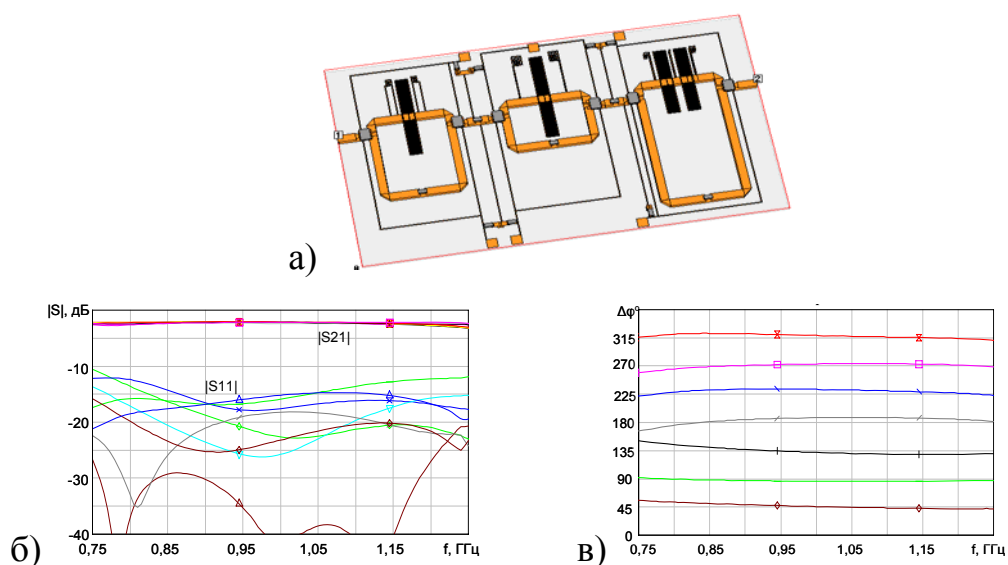


Рисунок 8. Топология (а), АЧХ (б), ФЧХ (в) трехразрядного ФВ.

Список литературы.

1. Вендик, И.Б. СВЧ фазовращатели и переключатели: Особенности создания на р-і-п диодах в интегральном исполнении / И.Б. Вендик, Г.С. Хижа, Е.А. Серебрякова // М.: Радио и связь, 1984. – 184 с.
2. Vendik, I.B. Theory of Digital Phase Shifters Based on High-T_c Superconducting Films / I.B. Vendik, O.G. Vendik, E.L. Kollberg, V.O. Sherman // IEEE Trans on MTT. – 1999. - V. 47, No. 8. -P.1553-1562.
3. Фуско, В. СВЧ цепи. Анализ и автоматизированное проектирование / под ред. В.И. Вольмана // М., Радио и связь, 1990. – 288с.
4. Шварц, Н.З. Линейные транзисторные усилители СВЧ // М., Сов. Радио, 1980. -368с.
5. Turalchuk, P. Broadband Small-Size LTCC Directional Couplers / P. Turalchuk, I. Munina, P. Kapitanova, D. Kholodnyak, D. Stoepel, S. Humbla, J. Muller, M.A. Hein, and I. Vendik // Proc. of 40th European Microwave Conference, Paris, France. – 2010. -P. 1162-1165.
6. <http://microsemi.com/en/products/product-directory/77457>

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК России:

- [1] Замешаева, Е.Ю. Дискретные многоуровневые СВЧ фазовращатель и аттенюатор, выполненные на элементах поверхностного монтажа [Текст] / Е.Ю. Замешаева, П.А. Туральчук, Д.В. Холодняк, М.Д. Парнес, Р.Г. Шифман, И.Б. Вендик // Успехи современной радиоэлектроники. – 2010. - №10. -С. 52-58.
- [2] Замешаева, Е.Ю. Аналоговый СВЧ-фазовращатель на основе композитной линии с положительной/отрицательной дисперсией, управляемой варикапами [Текст] / Е.Ю. Замешаева, И.Б. Вендик // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2012. - №1. – С. 5-12.

Другие статьи и материалы конференций:

- [3] Холодняк, Д.В. Широкополосный трехуровневый фазовращатель L-диапазона на переключаемых линиях передачи с положительной и отрицательной дисперсией [Текст] / Д.В. Холодняк, Е.Ю. Замешаева // Материалы межкафедрального научно-технического семинара «Инновационные разработки в СВЧ технике и электронике» СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2008. –С. 24-25.
- [4] Zameshaeva, E. L-band 3-bit phase shifter based on switchable left/right handed transmission lines (L-диапазона 3-уровневый фазовращатель на основе переключаемых “левых”/“правых” линий передачи) [Text] / E. Zameshaeva, D. Kholodnyak, I. Vendik // Proc. of 15th Anniversary International Student Seminar on Microwave and Optical Application of novel physical phenomena, St. Petersburg, Russia. - 2008. -P. 25-27.
- [5] Замешаева, Е.Ю. Миниатюрный аналоговый фазовращатель, выполненный по многослойной технологии [Текст] / Е.Ю. Замешаева, Д.В. Холодняк, П.А. Туральчук, П.В. Капитанова // Материалы научно-технического семинара «Инновационные разработки в технике и электронике СВЧ» СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2009. - С. 32.
- [6] Zameshaeva, E.Yu. Miniature Broadband Phase Shifter Based on 3 dB Directional Coupler (Миниатюрный широкополосный фазовращатель на основе 3-дБ направленного ответвителя) [Text] / E.Yu. Zameshaeva, P.A.Turalchuk D.V. Kholodnyak // Book of Abstracts of Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS), Moscow, Russia. - 2009. -P. 308.

- [7] Замешаева, Е.Ю. Малогабаритный дискретно-аналоговый 360° СВЧ-фазовращатель [Текст] / Е.Ю. Замешаева, И.Б. Вендик // Материалы научно-технического семинара «Инновационные разработки в технике и электронике СВЧ» СПбГЭТУ «ЛЭТИ» - 2010. - С. 36.
- [8] Замешаева, Е.Ю. Управляемые многоразрядные СВЧ-устройства на элементах поверхностного монтажа [Текст] / Е.Ю. Замешаева, П.А. Туральчук, Д.В. Холодняк, И.Б. Вендик, М.Д. Парнес // Материалы научно-технического семинара «Инновационные разработки в технике и электронике СВЧ» СПбГЭТУ «ЛЭТИ». - 2010. - С. 24.
- [9] Zameshaeva, E.Yu. Design of Miniature Microwave Phase Shifters Using Hybrid Integrated Circuits Technology and Surface Mounted Devices (Разработка миниатюрных микроволновых фазовращателей с применением технологии гибридных интегральных схем и компонентов поверхностного монтажа) [Text] / E.Yu. Zameshaeva, P.A. Turalchuk, D.V. Kholodnyak, I.B. Vendik, M.D. Parnes // Proc. of 17th International Student Seminar on Microwave and optical applications of novel phenomena and technologies, Ilmenau, Germany. - 2010. -P. 71-78.
- [10] Замешаева, Е.Ю. Аналоговые СВЧ фазовращатели проходного типа [Текст] / Е.Ю. Замешаева // Материалы Всероссийской конференции и научной школы молодых ученых «Новые материалы и нанотехнологии в электронике СВЧ», Санкт-Петербург, Россия. - 2010. -С. 102-104.
- [11] Kholodnyak, D.V. Broadband Microwave Devices Based on Artificial Transmission Lines (Широкополосные микроволновые устройства на основе искусственных линий передачи) [Text] / D.V. Kholodnyak, I.B. Vendik, P.A. Turalchuk, E.Yu. Zameshaeva, I.V. Munina // Proc. of 5th European Conference on Antenna and Propagation (EuCAP), Rome, Italy. - 2011. -P. 2820-2824.
- [12] Zameshaeva, E. 180° Analogue S-band Phase Shifter Based on Composite Right/Left-Handed Transmission Lines (180° аналоговый S-диапазона фазовращатель на основе композитной “левой”/“правой” линии передачи) [Text] / E. Zameshaeva, S. Humbla, D. Stoepel, M. Hein, I. Vendik // Proc. of 5th Congress on Metamaterials, Barcelona, Spain. – 2011. - P.358-360.