

Разработка широкополосных частотно-преобразующих GaAs МИС СВЧ на основе спиральных мостов Маршанда

Д.А. Войнов, А.В. Груша, А.В. Крутов

АО «НПП «Исток» им. Шокина»

Аннотация: в данной работе показано влияние укорачивающего конденсатора в спиральном мосту Маршанда в монолитном исполнении на характеристики широкополосных приборов. Применение укорачивающего конденсатора в спиральном мосту Маршанда позволяет снизить разбаланс амплитуд и фаз, уменьшить габаритные размеры моста на ~20 %. В приборах данная конструкция позволяет расширить диапазон частот, увеличить подавление синфазного сигнала на ~5-8 дБ. Разработан МИС СВЧ удвоителя частоты, работающий в диапазоне входных частот 4-13 ГГц при входной мощности 10-13 дБм. Разработан МИС СВЧ смесителя, работающий в диапазоне частот 18-42 ГГц и диапазоном промежуточных частот DC-20 ГГц.

Ключевые слова: GaAs, ДБШ, мост Маршанда, удвоитель, смеситель, МИС СВЧ, конденсатор над отверстием, укорачивающий конденсатор

1. Введение

Важным элементом в частотно-преобразующих широкополосных пассивных МИС СВЧ является симметрирующий трансформатор, который обеспечивает рабочий диапазон частот устройства и подавление синфазных сигналов. На сегодняшний день широкое применение получил классический 180° мост Маршанда [1], в планарном исполнении (рисунок 1а). Мост состоит из линий с боковой связью и имеет небалансный вход и балансный выход. Достоинством данного моста является широкая полоса частот от одной до двух октав и малые величины ошибок баланса амплитуд и фаз. Габариты классического моста Маршанда зависят от диапазона частот и равны электрической длине $\lambda/2$. Поэтому появились конструкции [2], где происходит сворачивание классического моста в спираль (рисунок 1б), что приводит к уменьшению габаритов. Однако это приводит к нарушению длины небалансной и балансных обмоток, тем самым увеличиваются разбаланс фаз и амплитуд, и происходит ограничение частотного диапазона.

В данной работе показано конструктивное решение, которое уменьшает ошибки баланса амплитуд и фаз спирального моста Маршанда. Показана реализация МИС СВЧ умножителей и смесителей на основе данной конструкции моста Маршанда.

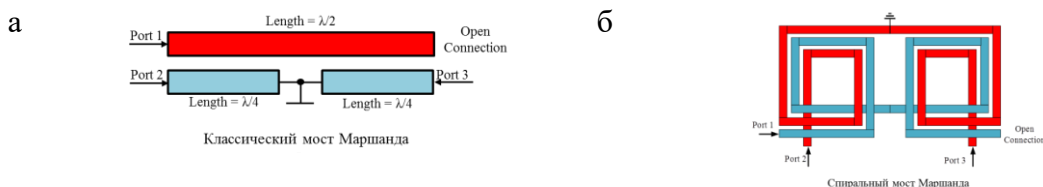


Рисунок 1. Схематическое изображение классического а) и спирального б) мостов Маршанда на связных линиях

2. Описание и моделирование конструкции

Моделирование проводили с использованием САПР Advanced Design System. Модель спирального моста Маршанда на связных линиях использованная при

моделировании показана на рисунке 2б. Анализ проводили для технологии GaAs толщиной 100 мкм, с двухуровневой металлизацией и воздушными мостами.

Влияние баланса амплитуд и фаз на ослабление синфазного сигнала [3] в симметрирующих трансформаторах показано на рисунке 2а.

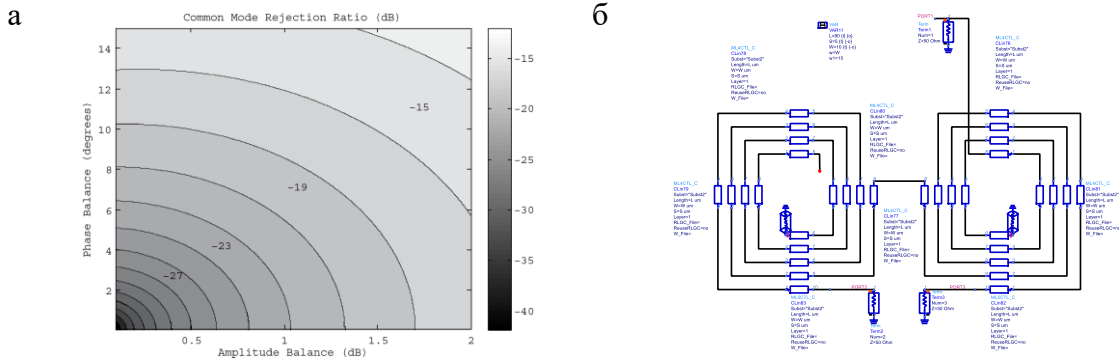


Рисунок 2. а) Зависимость подавления синфазного сигнала от величины ошибки баланса фаз и амплитуд; б) модель спирального моста Маршанда на связанных линиях

На рисунке 3 показаны расчетные амплитудно-частотные характеристики и ошибки баланса амплитуд и фаз спирального моста Маршанда. В первом случае небалансная обмотка имеет холостой ход. Второй случай — небалансная обмотка нагружена на конденсатор. В данном случае происходит смещение частотного диапазона вниз, улучшается баланс амплитуд в нижней части диапазона. Третий случай — уменьшение физической длины небалансной и балансных обмоток, до требуемой электрической длины, при подключенной реактивную нагрузку к небалансной обмотке.

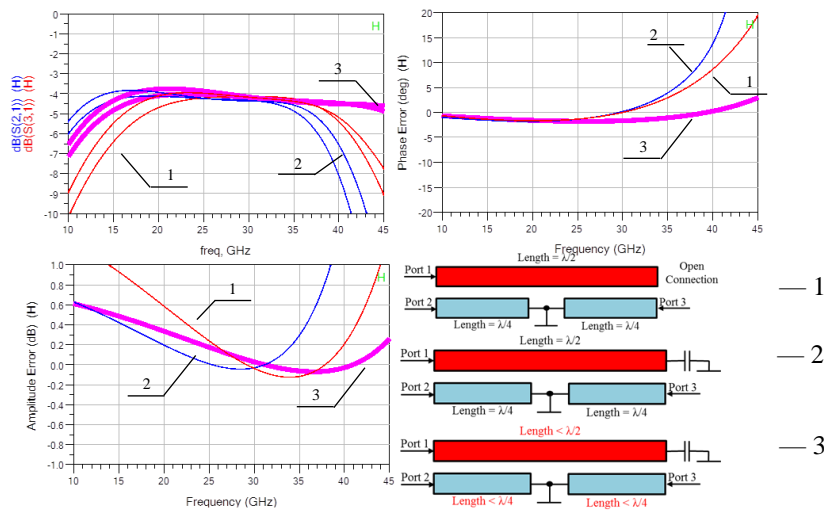


Рисунок 3. Амплитудно-частотные характеристики и ошибки баланса амплитуд и фаз спирального моста Маршанда

На рисунке 4а показана реализация рассчитанного моста Маршанда. Сравнение зондовых измерений баланса амплитуд и фаз проведено с расчетными результатами электромагнитной модели в диапазоне частот 18-40 ГГц. Величина ошибки по амплитуде составляет $\pm 0,5$ дБ, по фазе — ± 3 градуса. Габариты моста 150x260 мкм.

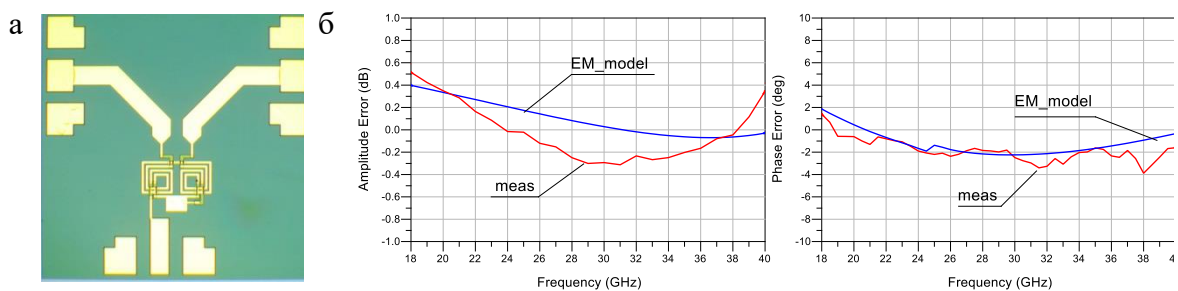


Рисунок 4. а) Микрофотография моста Маршанда; б) расчетные и измеренные характеристики моста Маршанда с укорачивающим конденсатором

3. Экспериментальные результаты приборов

На основе данной конструкции моста Маршанда был проведен расчет МИС СВЧ смесителей и удвоителей. Расчет проводили с использованием нелинейной модели диода с барьером Шоттки [4].

Приборы изготовлены в АО «НПП «Исток» им. Шокина» по технологии GaAs квазивертикальных диодов с барьером Шоттки [5]. Изготовитель гетероструктур — ООО «Коннектор Оптикс», С-Петербург. Барьер формируется металлизацией Ti-Pt-Au. Удельная емкость МДМ конденсаторов 200 пФ/мм².

Топологии МИС СВЧ удвоителя и смесителя изображены на рисунках 2а и 2б, соответственно. Размеры кристалла удвоителя составляют 1,17 мм × 1,08 мм, кристалла смесителя — 1,17 мм × 0,82 мм.

Также был изготовлен удвоитель по такой же топологии, но без применения укорачивающего конденсатора во входном мосту Маршанда, для оценки влияния на электрические характеристики.

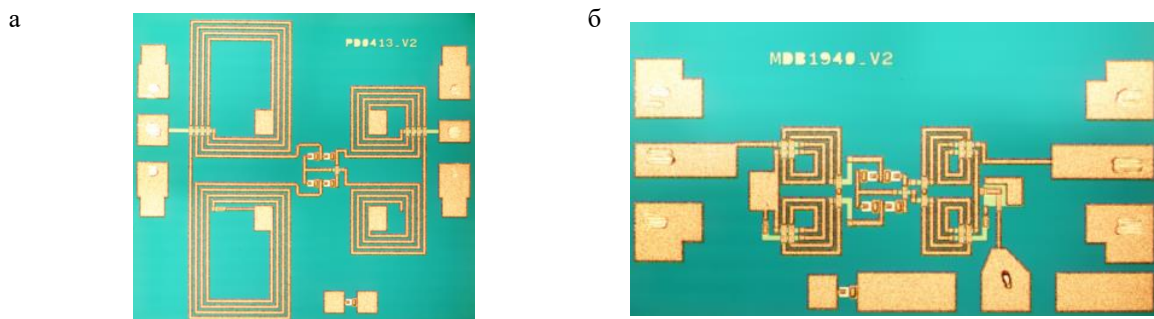


Рисунок 5. а) Микрофотография удвоителя; б) микрофотография смесителя.

Зависимости коэффициента преобразования от частоты удвоителя, показаны на рисунке 6а, измерения проведены при входной мощности от +7 дБм до +13 дБм с шагом 3 дБ. Разработанный удвоитель работает в диапазоне входных частот от 4 ГГц до 13 ГГц при малой входной мощности от +10 дБм. На рисунке 6б показаны зависимости развязок для первой, третьей и четвертой гармоник на выходе от мощности основного тона на входе. Применение укорачивающего конденсатора позволило получить в выходном спектре развязку первой гармоники от основного тона в широком диапазоне частот не менее 38 дБ, улучшение составило ~7 дБ. На другие гармоники данный конденсатор не оказывает сильного влияния.

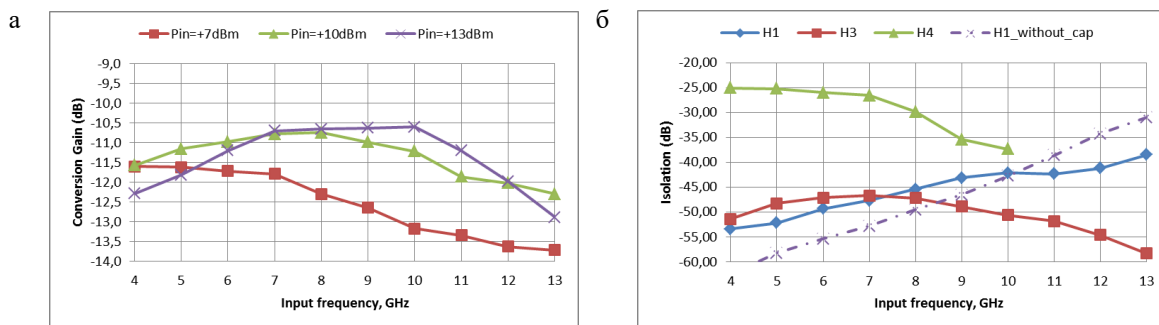


Рисунок 6. Измеренные характеристики удвоителя: а) зависимость коэффициента преобразования от частоты; б) зависимости развязок гармоник от частоты, при $P_{IN} = +13$ дБм.

Измеренные электрические характеристика смесителя показаны на рисунках 7, 8. Коэффициент преобразования не превышает 9 дБ в диапазоне частот 18-42 ГГц в режиме преобразования «вниз», при мощности гетеродина +13 дБм и промежуточной частоте 100 МГц. Диапазон промежуточных частот составляет DC-20 ГГц.

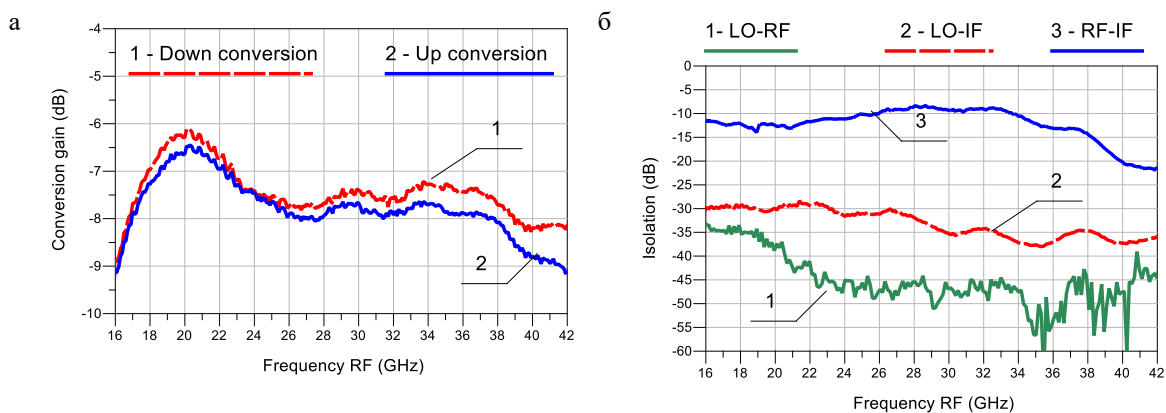


Рисунок 7. Измеренные характеристики смесителя: а) коэффициент преобразования; б) развязки LO-RF, LO-IF, RF-IF в режиме преобразования «вниз»

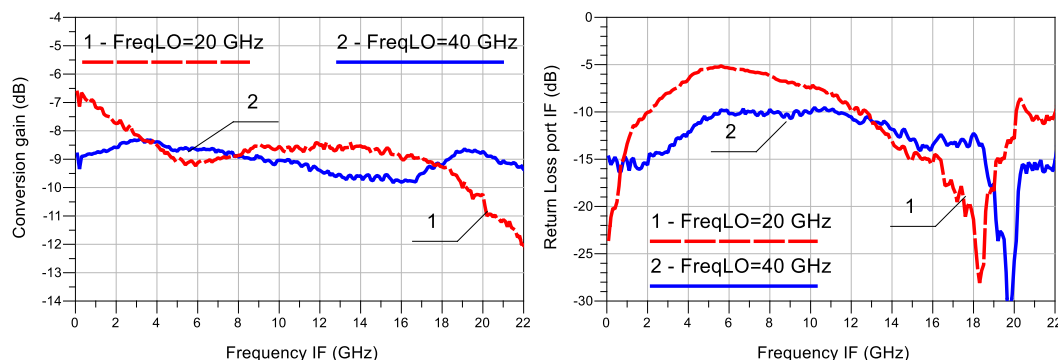


Рисунок 8. Измеренные зависимости смесителя зависимости коэффициента преобразования и возвратных потерь порта IF от частоты в режиме преобразования «вверх»

Применение укорачивающего конденсатора в смесителе позволило получить широкий диапазон промежуточных частот при верхней и нижней настройке гетеродина [6]. Так как в смесителе имеется частотное перекрытие диапазонов портам, то для улучшения КСВН порта IF, в цепи фильтра, применен конденсатор над заземляющим отверстием [7].

Сравнение электрических характеристик, разработанных МИС СВЧ удвоителя и смесителя с аналогами, приведены в таблице 1 и таблице 2, соответственно.

Таблица 1. Сравнение электрических параметров удвоителей

Параметры	MMD-1030H Marki Microwave	CMD225 Qorvo	MD701 АО «НПФ «Микран»	Данная работа
Входной диапазон частот, ГГц	5-15	4-8	5-13	4-13
Выходной диапазон частот, ГГц	10-30	8-16	10-26	8-26
Потери преобразования, дБ	11-14	12-16	10-16	10,5-13
Развязка 1 гармоники, дБ	42-70	36-60	40-58	38-55
Развязка 3 гармоники, дБ	52-75	47-58	42-75	46-60
Развязка 4 гармоники, дБ	25-40	25-50	29-60	25-40
Входная мощность, дБм	13	15	15	10-13
Площадь кристалла, мм ²	1,21	0,84	2,73	1,27

Таблица 2. Сравнение электрических параметров смесителей

Параметры	MM1-1857L Marki Microwave	MAMX-011037 Macom	NDAC09015 Neditek	Данная работа
Диапазон частот RF и LO, ГГц	18-40	18-46	19-40	18-42
Диапазон частот IF, ГГц	0-20	0-20	0-20	0-20
Потери преобразования, в диапазоне частот IF, дБ	6,5-13,0	6,5-10,5	7,0-10,5	6,5-11,0
Развязка LO-RF	40-55	29-60	26-38	32-48
Развязка LO-IF	20-35	35-58	30-40	29-36
Развязка RF-IF	14-35	8-35	12-20	9-20
Площадь кристалла, мм ²	1,61	1,12	0,8	1,07

3. Заключение

Применение укорачивающего конденсатора в спиральном мосту Маршанда позволяет снизить ошибки баланса амплитуд и фаз, уменьшить габаритные размеры моста на ~20 %. В приборах данная конструкция позволяет расширить диапазон частот, увеличить подавление синфазного сигнала на ~5-8 дБ. Разработанный удвоитель частоты превосходит аналоги по рабочей полосе частот и необходимой мощности накачки. Разработанный смеситель сравним с зарубежными аналогами.

Список литературы

1. Marchand N. Transmission Line Conversion Transformers // Electronics. – 1944. – Volume 17. – № 12. – С. 142-145.
2. Ang K. S. et al. A compact MMIC Balun Using Spiral Transformers //IMS Symposium Digest. – 1999.– С. 655-658.
3. Marki C. et al. A tutorial on baluns, balun transformers, magic-Ts and 180° Hybrids //Marki Microwave. – 2014.– С. 1-12.
4. Груша А.В., Крутов А.В., Ребров А.С. Нелинейная модель диода с барьером Шоттки на основе модели из Advanced Design System // Электроника и Микроэлектроника СВЧ. VI Всероссийская научно-техническая конференция. Санкт-Петербург. 2017. С. 203-307.
5. Груша А.В., Крутов А.В., Ребров А.С. Ограничители СВЧ мощности M44427 // Электроника и Микроэлектроника СВЧ. VI Всероссийская научно-техническая конференция. Санкт-Петербург. 2017. С. 236-240.
6. Zhang T. et al. A GaAs passive mixer with an ultra-wide IF bandwidth //IEICE Electronics Express. – 2017. – Volume 14. – №. 1. – С. 1-6.
7. Груша А.В. Крутов А. В., Ребров А. С. Конструктивно-технологические особенности конденсатора с заземляющими отверстиями в МИС СВЧ. // 2019 29th Int. Crimean Conf. “Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo’2019). Sevastopol, 2019.