

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Кулинич Ивана Владимировича
«Микроэлектромеханический переключатель для сверхвысокочастотных широкополосных интегральных схем», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.07 – «Антенны, СВЧ - устройства и их технологии»

Актуальность работы

Диссертационная работа Кулинич И.В. посвящена актуальной теме - разработке нового микроэлектромеханического элемента, используемого в современном цифровом телекоммуникационном и измерительном оборудовании СВЧ диапазона. Как известно, обычные полупроводниковые диодные и транзисторные коммутационные устройства в диапазоне частот 10-40 ГГц имеют значительные прямые потери и недостаточную развязку в режиме «выключено». Поэтому разработка широкополосных СВЧ коммутаторов по новой технологии, несомненно, имеет большое значение для развития теории и практики построения сложных СВЧ систем.

Соответствие диссертации представленной специальности

Объектом исследования в диссертации Кулинич И.В. является микроэлектромеханическое коммутационное устройство СВЧ диапазона. Автором разработана оригинальная 3D технология его изготовления, совместимая с классической технологией изготовления полупроводниковых интегральных СВЧ микросхем. Таким образом, представленная диссертация соответствует паспорту специальности 05.12.07 – «антенны, СВЧ устройства и их технологии», пункт 2 и 3.

Содержание диссертационной работы

В состав диссертации входят введение, 5 глав, заключение, список литературы из 89 наименований. Объем диссертации – 113 с., в том числе 93 рисунка и 4 таблицы.

Цель работы заключается в проведении исследований, разработке и создании СВЧ микроэлектромеханического ключа на основе медной металлизации и СВЧ МИС, включающей МЭМ ключ, изготовленных в едином технологическом цикле.

В соответствии с данной целью работа направлена на создание СВЧ микросхем нового типа, в которых используется комбинация микросистемных элементов, пленочных микрополосковых элементов и интегральных полупроводниковых диодов и транзисторов различного типа. Существенной особенностью данного подхода является реальное изготовление микросхем в едином технологическом цикле.

В **первой главе** (с. 11-47 диссертации) проведен обзор существующих конструкций микроэлектромеханических ключей, технологий их изготовления и корпусирования. Описаны способы оценки надежности механических конструкций. Обоснована актуальность исследования в выбранной диссертационной области, сформулированы задачи исследования.

Во **второй главе** (с. 49-60 диссертации) описана техника и методика проводимых экспериментов. Приведено подробное описание тестовых структур, применяемые в разработке методик формирования ключевых элементов микроэлектромеханического ключа и технологии его корпусирования.

Третья глава (с. 60-86 диссертации) посвящена разработке механической и электрической модели микроэлектромеханического ключа. Проведены исследования подвижной балки МЭМ ключа, определены оптимальные геометрические размеры, позволяющие обеспечивать высокую надежность прибора и требуемые электрические параметры. По разработанной модели МЭМ ключа определены его частотные характеристики. На основании проведенных исследований разработана конструкция СВЧ МЭМ ключа, а также разработана модель герметичного корпуса МЭМ ключа.

В **четвертой главе** (с. 89-10 диссертации) представлена конструкция СВЧ МЭМ ключа на основе технологии изготовления GaAs СВЧ МИС. По результатам проведенных исследований разработаны технологические маршруты формирования подвижной балки СВЧ МЭМ ключа, формирования корпуса СВЧ МЭМ ключа, формирования секции аттенюатора на основе СВЧ МЭМ ключей.

В **пятой главе** (с. 101-104 диссертации) приведены результаты экспериментального исследования электрических характеристик разработанного СВЧ МЭМ ключа с медной металлизацией. Испытания на постоянном токе показали, что выход годных приборов составляет не менее 70%; среднее значение контактного сопротивления равно 2,46 Ом, время включения составило 80 мкс. Экспериментальные измерения, проведенные автором, показали, что разработанный МЭМ ключ в открытом состоянии вносимые потери на частоте 25 ГГц не превышают 0,4 дБ, а изоляция (развязка) не хуже -25 дБ.

Новизна, обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Новизна полученных автором результатов состоит в разработке нового метода построения интегральных СВЧ микросхем, заключающегося в том,

что рамках классической GaAs полупроводниковой технологии реализованы микроэлектромеханические элементы за счет применения медной металлизации в качестве основного материала для СВЧ МЭМ ключа и СВЧ МИС. Разработанная конструкция и технология изготовления СВЧ МЭМ ключа позволяет создавать современные СВЧ монолитные интегральные схемы различного назначения на основе МЭМ ключей и изготавливать их в едином технологическом цикле.

Обоснованность и достоверность полученных диссертантом результатов обеспечена корректным применением законов физики и теории СВЧ цепей, а также проведением компьютерного моделирования и использованием сертифицированных и поверенных автоматизированных измерительных комплексов и приборов. Моделирование механических характеристик проведено с применением сертифицированного программного обеспечения Comsol Multiphysics, в котором решение дифференциальных уравнений в частных производных осуществляется с помощью численных методов и методом конечных элементов. Результаты моделирования в частотной области обоснованы применением сертифицированного программного обеспечения EDA AWR Microwave Office.

Значение для теории и практики научных результатов, выводов и положений, сформулированных в диссертации

Как показал анализ представленных материалов, диссертационная работа Кулинича И.В. имеет большую практическую направленность и насыщена большим объемом эксперимента, выполненного на современном высокотехнологичном оборудовании. Важным свидетельством практической значимости проведенных диссертантом исследований является Акт о внедрении, полученный от АО «НПФ «Микран» и приложенный к работе.

Таким образом, полученные автором диссертационной работы результаты обладают научной и существенной практической значимостью.

Подтверждение опубликования основных результатов диссертации

Основные результаты, полученные в диссертационной работе, опубликованы в 13 печатных работах, из них 2 в рецензируемых изданиях, рекомендованные ВАК. Все представленные на защиту результаты получены автором лично и неоднократно обсуждались на научных конференциях.

Считаю, что основное содержание диссертации, её основные научные положения и практические результаты достаточно полно отражены в публикациях и докладах автора.

Замечания по диссертационной работе

1. В работе представлены результаты компьютерного моделирования прямых и обратных потерь СВЧ МЭМ ключа в диапазоне частот до 40 ГГц, однако измерения экспериментального образца проведены только до 25 ГГц.

2. Не приведены исследования влияния температуры на электрические характеристик СВЧ МЭМ ключа.

3. В работе и недостаточно подробно описан принцип построения и характеристики трехразрядного дискретно регулируемого аттенюатора.

4. В тексте диссертации встречаются орфографические и стилистические ошибки.

5. Некоторые ссылки на литературу оформлены не в соответствии с общепринятыми правилами.

Заключение

Несмотря на указанные замечания, не касающиеся существа работы, считаю, что диссертация Кулинича Ивана Владимировича представляет собой законченную самостоятельную квалификационную работу, в которой достигнуты важные научные и практические результаты. Работа отвечает требованиям п. 9 Положения (утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года, № 824) о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.07 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии.

Официальный оппонент,
д.т.н., профессор ФГБОУ ВО
«Новосибирский государственный технический университет»,
Профессор кафедры теоретических основ радиотехники.

Разинкин Владимир Павлович

 Разинкин В.П.

630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20,

Тел. +7(383)346-08-34, e-mail: razinkin_vp@mail.ru

Подпись Разинкина В.П. заверяю:

Начальник ОК НГТУ



 Пустовалова О.К.

06.12.2019 г.