

ОТЗЫВ

официального оппонента

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

Актуальность темы работы

Устройства переключения СВЧ сигналов являются важным элементом широкополосных систем радиосвязи и радиолокации. Расширение функциональных возможностей и повышение технических характеристик радиоэлектронных систем связано с коммутацией СВЧ сигналов, важно чтобы используемые СВЧ переключатели имели минимальные вносимые потери мощности и достаточную развязку в отключенном состоянии, высокую линейность проходной динамической характеристики, а также минимальные размеры и возможность интеграции в технологический процесс изготовления СВЧ монолитных интегральных схем (МИС) для построения сложно-функциональных СВЧ МИС. Перспективным направлением улучшения характеристик СВЧ переключателей является их реализация в виде микроэлектромеханических (МЭМ) устройств.

В диссертационной работе Кулинича Ивана Владимировича решена важная и актуальная задача разработки технологического процесса и конструкции МЭМ переключателя СВЧ на основе медной металлизации на GaAs подложке, а также задача его корпусирования на уровне пластины, что *подтверждает актуальность избранной темы диссертации.*

Общая характеристика работы

Диссертация изложена на 114 страницах, состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, содержит 4 таблицы, 93 рисунка.

Во введении определена цель работы как исследование и разработка СВЧ микроэлектромеханического переключателя и разработка технологического процесса его изготовления с медной металлизацией на GaAs полупроводниковой подложке. Также сформулированы научные положения, выносимые на защиту, указаны научная новизна и практическая значимость результатов проведенного исследования, указаны методология и методы исследования, представлена апробация полученных результатов работы.

В первой главе представлен литературный обзор по теме диссертации. Определены основные тенденции развития и рассмотрены существующие варианты конструкции и технологии изготовления МЭМ переключателей. Для изготовления МЭМ переключателя на подложке из GaAs выбрана технология поверхностной микрообработки, как наиболее близкая к технологическому процессу изготовления GaAs СВЧ МИС. Отмечено, что замена золотой металлизации на медную металлизацию позволит снизить механические напряжения в конструкции МЭМ переключателя. Выявлено, что существующие технологии корпусирования МЭМ устройств имеют существенные отличия от технологического процесса изготовления GaAs СВЧ МИС, в этой связи

поставлена задача разработки совместимого технологического процесса корпусирования. По результатам обзора сформулированы направления дальнейшего диссертационного исследования.

Во второй главе представлены оборудование и экспериментальные методы, использовавшиеся при выполнении диссертационной работы. Также приведено описание тестовых структур, использованных для отработки методов формирования элементов конструкции МЭМ переключателя СВЧ.

В третьей главе представлены результаты проектирования, моделирования МЭМ переключателя СВЧ в части его механических и электродинамических характеристик, в том числе с учетом влияния корпуса.

Приведены результаты проектирования и моделирования его корпуса на основе каркаса из пространственной рамы, которая обеспечивает свободный объем для подвижной балки МЭМ переключателя. Представлены результаты моделирования деформации и распределения фракций растворителя для различных вариантов пространственной рамы корпуса.

Приведены результаты моделирования электродинамических характеристик МЭМ переключателя СВЧ при изменении размеров элементов его конструкции, а также представлены электродинамические характеристики спроектированной переключаемой секции аттенюатора с ослаблением 8 дБ на основе трех МЭМ переключателей СВЧ.

В четвертой главе приводятся результаты разработки технологического процесса изготовления МЭМ переключателя СВЧ на подложке GaAs с медной металлизацией по технологии 3D литографии. Отмечены недостатки изготовления МЭМ переключателя СВЧ с использованием стандартных операций изготовления GaAs СВЧ МИС, которые проявляются в неравномерном воздушном зазоре между балкой и сигнальной линией. Предложены технологические операции, позволяющие исключить указанные недостатки.

В пятой главе представлены результаты проведения экспериментальных исследований, изготовленных образцов МЭМ переключателей СВЧ на подложке GaAs. Приведено исследование временной характеристики переключения, амплитудно-частотных характеристик в открытом и закрытом состояниях, а также статистики распределения контактного сопротивления по пластине. Показано, что изготовленный МЭМ переключатель СВЧ на подложке GaAs обеспечивает вносимые потери менее 0,32 дБ, развязку более 30 дБ в диапазоне частот до 20 ГГц при напряжении управления 25 В и время переключения 80 нс, имеет параметры на уровне лучших зарубежных и отечественных аналогов.

Степень обоснованности научных положений, выводов и результатов

Научные положения, выводы и результаты, представленные в работе, основаны на использовании численного моделирования механических и электродинамических процессов, происходящих в конструкции МЭМ переключателя СВЧ.

Достоверность полученных результатов проверялась экспериментальными исследованиями СВЧ характеристик, исследованием размеров и геометрии конструкции МЭМ переключателя. Используемые методы и средства *обеспечивают достоверность* выдвинутых научных положений, выводов и научных результатов.

Основные результаты исследований и их научная новизна

Научная новизна диссертационной работы Кулинича И.В. заключается в новой конструкции, технологическом процессе изготовления и корпусирования на уровне пластины МЭМ переключателя СВЧ с медной металлизацией на подложке GaAs с параметрами на уровне лучших зарубежных и отечественных аналогов.

Практическая значимость работы

Разработанная конструкция МЭМ переключателя СВЧ и технологические модули могут быть использованы в НИОКР по разработке сложно-функциональных СВЧ МИС на основе GaAs.

Кроме того, разработанные технологические модули могут быть рекомендованы для внедрения в базовый технологический процесс отечественных GaAs фаундри, например, АО «Светлана-Рост», а конструкция МЭМ переключателя СВЧ может быть реализована и использоваться как сложно-функциональный блок (IP-блок) в составе базового технологического процесса фаундри.

Замечания по работе

1. Во введении для обозначения СВЧ МИС содержащих несколько аналоговых функциональных блоков на кристалле используется термин "система на кристалле", что является необоснованным и ошибочным.
2. Указанные в практической значимости предпосылки для гетероинтеграции GaAs и Si интегральных схем неочевидные, неясно, что является основанием для этого.
3. В диссертационной работе не рассмотрены важные характеристики МЭМ переключателя СВЧ, такие как, точка компрессии на 0,1 дБ, а также предельные уровни входной мощности в фиксированном состоянии и в режиме переключения.
4. В работе описан способ корпусирования в среде воздуха, однако для обеспечения длительных сроков эксплуатации и хранения микроэлектронных устройств важно обеспечить инертную среду в подкорпусном пространстве, например, азот.
5. Не рассмотрены задачи, которые еще необходимо решить для совмещения МЭМ переключателя с НЕМТ и прочими элементами GaAs техпроцесса.

Отмеченные недостатки не снижают научную и практическую ценность диссертационного исследования Кулинича И.В. и полученных в нем результатов.

Заключение


Считаю, что диссертационная работа Кулинича Ивана Владимировича «Микроэлектромеханический переключатель для сверхвысокочастотных широкополосных интегральных схем» является завершённым научно-квалификационным исследованием, вносит значительный вклад в развитие устройств переключения СВЧ сигналов в составе СВЧ МИС на основе GaAs.

Диссертационная работа Кулинича И.В. полностью соответствует Положению «О порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением №842 Правительства Российской Федерации от 24.09.2013, а её автор Кулинич Иван Владимирович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии».

Официальный оппонент,

Будяков Алексей Сергеевич
начальник отдела «ЦП-1» НО №8
АО «НПП «Пульсар»,
к.т.н. (номер специальности 05.13.05)

09.12.19


ПОДПИСЬ

Подпись Будякова Алексея Сергеевича заверяю



Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Пульсар»
105187, г. Москва, Окружной проезд, дом 27, АО «НПП «Пульсар»
Тел./факс: (495)-365-04-70, E-mail: budyakov@pulsarnpp.ru

О.В. ПЛИСКО



