

В диссертационный совет Д 002.204.01
в Физико-технологический институт
Российской академии наук

Отзыв

официального оппонента на диссертацию

Щаврука Николая Васильевича

на тему «Проектирование и изготовление микроэлектромеханических переключателей на подложках GaAs для СВЧ диапазона»
по специальности 05.27.01 – «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах»
на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Актуальность избранной темы

Диссертация Щаврука Н.В. посвящена расчетам и созданию микроэлектромеханического (МЭМС) переключателя с электростатическим типом управления для СВЧ диапазона. СВЧ переключатели играют существенную роль в электронной технике и активно применяются в радиолокации, спутниковой связи многоканальных системах беспроводной связи и спутниковой навигации. На сегодняшний день существует необходимость оптимизации конструкции переключателей и поиска новых решений для улучшения характеристик переключателей. В настоящее время СВЧ переключатели сигнала в основном представлены электромеханическими моделями (реле) и моделями на полупроводниковых приборах, а также новым, активно развивающимся направлением - переключателями на основе МЭМС технологий. Из всего многообразия типов СВЧ МЭМС переключателей наиболее распространенным является

электростатический тип. Это связано с тем, что для его создания можно использовать технологию изготовления интегральных схем, дополненную специальными технологическими процессами. Кроме того, МЭМС переключатели электростатического типа обладают меньшими размерами, более высоким быстродействием и малой потребляемой мощностью. Также в работе Н.В. Щаврука решается проблема интеграции в единый технологический цикл изготовления МЭМС компонентов совместно с изготовлением монолитных интегральных схем (МИС) на основе GaAs.

Поэтому тема диссертационной работы, посвященная вопросам проектирования и изготовления МЭМС переключателей на основе GaAs, является актуальной.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

При решении задач, представленных в работе, автор опирался на ряд теоретических и практических данных. Выводы и положения диссертации подтверждены теоретическим анализом, численным моделированием, сопоставлением экспериментальных данных с ранее полученными результатами. При разработке МЭМС переключателя были использованы методы вычислительной математики, моделирования в системах автоматизированного проектирования. Наряду с теоретическим аспектом, в работе проработана и прикладная часть исследования, направленная на оптимизацию технологического процесса изготовления СВЧ МЭМС переключателей. Кроме того, основой, объединяющей все вышеперечисленные теории и методы, служит системный подход к достижению поставленной цели.

Достоверность и новизна, полученных результатов

Достоверность проведенных исследований и представленных в работе экспериментальных результатов обеспечивается результатами компьютерного моделирования при помощи средств автоматизированного проектирования

AWR и ADS, а также согласованностью теоретических и экспериментальных результатов с имеющимися данными, приведенными в отечественной и зарубежной литературе.

Научная новизна работы сформулирована в следующем составе:

1. Разработана методика расчета и проектирования СВЧ МЭМС переключателя применительно к ограничениям, накладываемым технологией изготовления МИС на арсениде галлия.
2. Разработана технология удаления «жертвенного слоя», с использованием циклогексана, впервые примененного для сублимационной сушки мембран МЭМС переключателей.
3. Впервые разработан базовый технологический маршрут для изготовления СВЧ МЭМС переключателей и МИС на основе арсенида галлия в едином цикле изготовления приборов.
4. Разработана оригинальная методика измерения СВЧ параметров МЭМС переключателей.
5. Изготовлены и исследованы характеристики СВЧ МЭМС переключателей на основе арсенида галлия.

Для подтверждения новизны диссертационной работы приведены практические результаты в виде модели и результатов расчета основных параметров СВЧ МЭМС переключателей, технологического маршрута изготовления МЭМС устройств, совмещенного с процессом изготовления полупроводниковых приборов в едином цикле, результатов измерений параметров изготовленных макетов СВЧ МЭМС переключателей.

Теоретическая и практическая значимость полученных автором результатов

К важным теоретическим результатам относится методика расчета и проектирования СВЧ МЭМС переключателя, учитывающая ограничения, накладываемые технологией изготовления МИС на основе арсенида галлия. К практическим результатам относится совместимость предложенного

технологического маршрута изготовления МЭМС устройств с процессом изготовления полупроводниковых приборов МИС в едином цикле. Кроме того, применение оригинального метода удаления жертвенного слоя позволяет получать СВЧ МЭМС переключатели и полупроводниковые транзисторные структуры на одном кристалле арсенида галлия. К практическим результатам также можно отнести измеренные параметры, изготовленных макетов СВЧ МЭМС переключателей, оказывающие влияние на характеристики СВЧ МЭМС переключателей в процессе изготовления.

Диссертационная работа Щаврука Н.В., в которой рассмотрены вопросы проектирования и изготовления МЭМС переключателей для СВЧ диапазона на основе технологий обработки арсенида галлия, которые представляют большой практический интерес для разработчиков конструкций и технологий перспективного класса микроэлектронных компонентов, позволяющих заменить зарубежные аналоги.

Оценка содержания диссертации, её завершенность

Диссертация Щаврука Н.В. объемом 127 страниц содержит введение, четыре главы, заключение, список литературы и 5 приложений.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и вытекающие из нее задачи исследований. Изложены научная новизна и практическая значимость, сформулированы положения выносимые на защиту.

В первой главе диссертации проведен обзор научно-технической литературы и проведен анализ состояния теоретических и экспериментальных исследований, проводимых в РФ и за рубежом в области МЭМС переключателей сигналов СВЧ диапазона. Рассмотрены и проанализированы основные типы МЭМС переключателей. На основе анализа предложены механизм управления и тип контакта для использования в проектируемом СВЧ МЭМС переключателе.

Вторая глава посвящена моделированию и расчету параметров СВЧ МЭМС переключателя для диапазона частот 10-12 ГГц. Для минимизации размера МЭМС-переключателя было выбрано крепление мембраны в форме меандра. Модель МЭМС-переключатель с металлической мембраной была проанализирована с точки зрения эквивалентной электротехнической и электромеханической схем. В первом случае была рассчитана амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) сигнала, проходящего через переключатель, во включённом и выключенном состояниях. Во втором случае была определена взаимосвязь геометрических размеров МЭМС-переключателя с величиной напряжения срабатывания. На основании проведённых расчётов был спроектирована конструкция конкретного МЭМС-переключателя с требуемыми характеристиками.

Третья глава посвящена вопросам изготовления СВЧ МЭМС переключателя. Была разработана и реализована новая технология изготовления МЭМС-переключателей на основе GaAs. Существенным отличием разработанной технологии изготовления МЭМС-переключателей от существующей технологии изготовления МИС является использование операции удаления жертвенного слоя, позволяющая получить мембрану МЭМС-переключателя отделенную от подложки GaAs. За счет процесса травления жертвенного слоя в кислородной плазме и метода сублимационной сушки в циклогексане были решены проблемы прилипания мембраны к управляющему электроду.

Четвертая глава посвящена измерениям характеристик изготовленных макетов СВЧ МЭМС переключателей. На основе измеренных вольт-фарадных характеристик было определено управляющее напряжение и даны оценки по зазору между мембраной и управляющим электродом. В результате анализа данных характеристик был сделан вывод о том, что при удалении жертвенного слоя в кислородной плазме происходит коробление мембран, а удаление жертвенного слоя методом сублимационной сушки в циклогексане даёт положительные результаты. По результатам измерения АЧХ сигналов,

проходящих через МЭМС-переключатели во включённом и выключенном состояниях, были определены основные характеристики изготовленных макетов СВЧ МЭМС-переключателей, которые представлены следующими значениями напряжения срабатывания на уровне 19 В, изоляции сигнала на уровне 45–50 дБ, вносимые потери на уровне 0,5 дБ.

В заключении представлен список с обобщающими выводами и полученными результатами по главам диссертации.

В приложениях автором представлены топологии разработанных фотошаблонов для изготовления СВЧ МЭМС переключателей, последовательность технологических операций изготовления образцов СВЧ МЭМС переключателей на основе совмещения с техпроцессами изготовления МИС малошумящих усилителей на основе GaAs, копии четырех свидетельств о государственной регистрации топологии интегральных схем и акт внедрения результатов диссертационной работы.

Автореферат соответствует содержанию диссертации, включает в своем составе общую характеристику, основное содержание, основные результаты и выводы по работе. Диссертация и автореферат по структуре правильно оформлены, в соответствии с требованиями системы стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу (ГОСТ Р 7.0.11-2011).

Полнота опубликованных работ

Автором было опубликовано 13 печатных работ, четыре из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки Российской Федерации для публикации результатов научно-технической и научно-практической деятельности на соискание ученой степени кандидата и доктора наук. В данных работах отражены научно-технические результаты, приведенные в диссертации. Технические решения, представленные в диссертационной работе, закреплены 4 свидетельствами о государственной регистрации топологии интегральных схем.

Замечания по диссертационной работе

Замечания к автореферату следующие

1. Не ясно, откуда взята специфическая формула (7) для коэффициента упругости меандра.
2. Не ясно, почему для модели МЭМС-переключателя его параметры определялись для диапазона частот 10–12 ГГц, а для изготовленных макетов МЭМС-переключателей – при частотах 14 и 14,3 ГГц.
3. Не ясно с чем связаны большие потери в изготовленных МЭМС-переключателях.

Замечания по диссертационной работе в целом

1. Выводы из первой главы должны содержать постановку задачи, а у автора постановка задачи сформулирована в начале второй главы, посвященной моделированию и расчету МЭМС переключателя;
2. В третьей главе диссертации рассмотрены три метода удаления жертвенного слоя: сублимационная сушка, метод сушки при критической температуре в CO_2 и сухое травление. При этом, метод сушки в CO_2 позиционируется как общепризнанный, но нет сравнения результатов сублимационной сушки и сушки при критической температуре в CO_2 ;
3. В результатах исследования изготовленных макетов МЭМС переключателей не приведены данные о мощности переключаемого сигнала.

Заключение о соответствии диссертации критериям,

установленным положениям о присуждении ученых степеней

Несмотря на указанные недостатки, рассматриваемая диссертация на тему «Проектирование и изготовление микроэлектромеханических переключателей на подложках GaAs для СВЧ диапазона» является научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные технические решения, направленные на совершенствование технических

характеристик микроэлектромеханических переключателей для СВЧ диапазона, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие экономики и обороноспособности нашей страны.

Представленная диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук соответствует требованиям п. 9-11 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 года, а её автор Щаврук Николай Васильевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук, по специальности 05.27.01 – «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах».

Официальный оппонент:

Амеличев Владимир Викторович

кандидат технических наук,

05.27.01 – «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах»,

124498, г. Москва, г. Зеленоград, проезд 4806, дом 5, НПК «Технологический центр», +7 499 720-87-79, V.Amelichev@tcen.ru

федеральное государственное бюджетное учреждение «Научно-производственный комплекс «Технологический центр» МИЭТ»

Начальник отдела микросистемной техники



В.В. Амеличев

«27» 11 2015 г.

Подпись В.В. Амеличева заверяю

Начальник ОК

