

КОММУТАЦИОННАЯ ТЕХНИКА НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЙ МСТ

*И.А. Афиногенов, А.В. Конькин, А.В. Орлов, А.В. Кустова
173000, Россия, г. Великий Новгород, ул. Нехинская, 55, ОАО «СКТБ РТ»*

В статье представлены работы, проводимые в ОАО «СКТБ РТ» в области микроэлектромеханических систем. Показаны принципы разработки и проектирования слаботочных, высокочастотных, оптических микрореле и микропереключателей.

In the paper, works carried out in „SDED RT“ ISC in the field of micro-electromechanical systems are presented. Principles of development and designing of low-current, high-frequency, and optical microrelays as well as microswitches have been shown.

Введение

Микросистемная техника (МСТ) является в настоящее время одним из наиболее динамично развивающихся научно-технических направлений. В рамках данного направления создаются миниатюрные чувствительные, исполнительные и энергообеспечивающие системы, в основе функционирования которых лежит активное использование классических принципов механики, оптики, акустики, электротехники, теплотехники, химии и биологии, интегрируемых в конструктивные решения на микроуровне с широким использованием материаловедческой и технологической баз микро- и оптоэлектроники. Микромашины, механизмы и приборы микросистемной техники по стоимости, надежности, ресурсу, массогабаритным показателям, энергопотреблению, широте и эффективности применения намного превосходят традиционные аналоги.

Для удобства разработки МЭМС в настоящее время созданы специализированные системы проектирования, с помощью которых проектируются одновременно и механическая, и электрическая часть микросистемы.

1. Виды МЭМС-переключателей с электростатическим принципом управления, разрабатываемые в ОАО «СКТБ РТ»

Впервые мир заговорил о кремнии в начале 80-х годов двадцатого века, когда благодаря ему произошла революция в сфере технологий производства ИС. Позже кремний стал использоваться для изготовления миниатюрных прецизионных механических систем. В конце 1970-х годов американский ученый К.Е. Петерсен (K.E. Petersen) разработал новый класс механических мембранных микропереключателей, реализованных на подложке из кремния. Такие электростатические микропереключатели могли коммутировать низкочастотный электрический сигнал, и их характеристики представляли собой нечто среднее между параметрами электромагнитных реле и традиционных ключей на кремниевых транзисторах [1].

Разрабатываемые электростатические микрореле можно разделить на несколько групп по различным признакам:

1. По виду коммутируемого сигнала:
 - слаботочные микрореле;
 - высокочастотные микрореле;
 - оптические микрореле.

2. По виду исполнительного механизма:

- мембранные;
- консольные;
- встречно-штыревые.

3. По принципу коммутации:

- с резистивным соединением (металл – металл);
- с емкостным соединением (металл – диэлектрик – металл);
- с отражением сигнала.

Для формирования структур микрореле, где перемещения исполнительного механизма редко превышают значение 5 мкм, наиболее подходящими видами являются мембранные и консольные актюаторы с электростатическим принципом управления. Данные структуры просты и могут быть выполнены в сверхминиатюрном исполнении.

Классический ключ (рис. 1) с резистивным соединением служит для получения омического контакта. Такие ключи могут коммутировать как постоянные токи, так и работать в СВЧ-диапазоне до 18 ГГц и более.

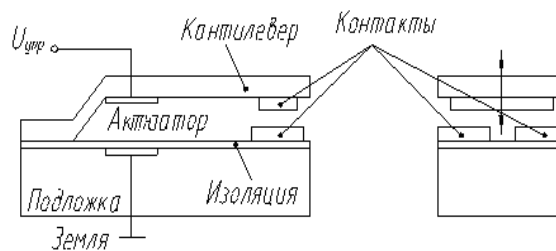


Рис. 1. Схема микрореле с резистивным соединением консольного типа

Ресурс таких ключей ограничен деградацией контактных площадок. В наших разработках, на сегодняшний день, удается достигнуть 1,5 млн циклов переключений при мощности до 50 мВт в режиме согласованной нагрузки, не приводящих к значительному увеличению сопротивления контактов. Ведутся работы по дальнейшему совершенствованию контактной системы с ресурсом до 1 млрд циклов переключения.

В ключе же с емкостным соединением (рис. 2) используется отношение емкостей во включенном и выключенном состояниях. Применение емкостных ключей исключает низкочастотный диапазон.

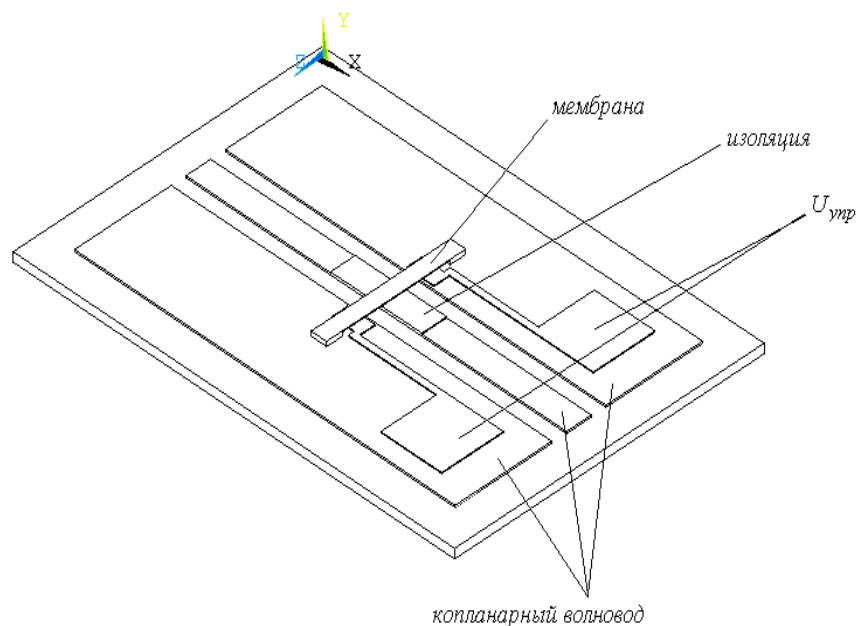


Рис. 2. Схема микрореле с емкостным соединением мембранного типа

Неоспоримым преимуществом такого рода микрореле является отсутствие омического контакта. Исключая электрическую деградацию контактной системы, можно на 2-3 порядка увеличить ресурс контактной системы. Ограничением в таком случае будет только усталостное разрушение мембранного исполнительного механизма.

Обособленной группой можно выделить оптические микрореле (рис. 3).

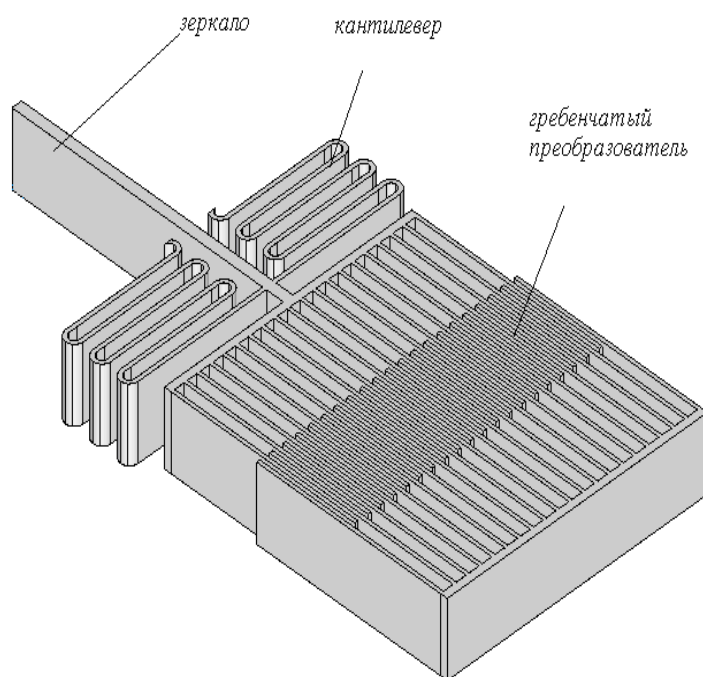


Рис. 3. Схема микрозеркала с встречно-штыревым преобразователем

Синергетическая комбинация технологий MEMS с оптоэлектроникой развивалась в класс интегрированных микросистем, которые часто называют микрооптоэлектромеханическими системами (МОEMS). В основе таких ключей лежит подвижная зеркальная поверхность (зеркало). Механическая часть оптического переключателя формируется в объеме кремния. Такой подход позволяет формировать актюатор, микрозеркало и каналы для подводящего оптоволокна (рис. 4) в один процесс, что упрощает сборку конечного изделия.

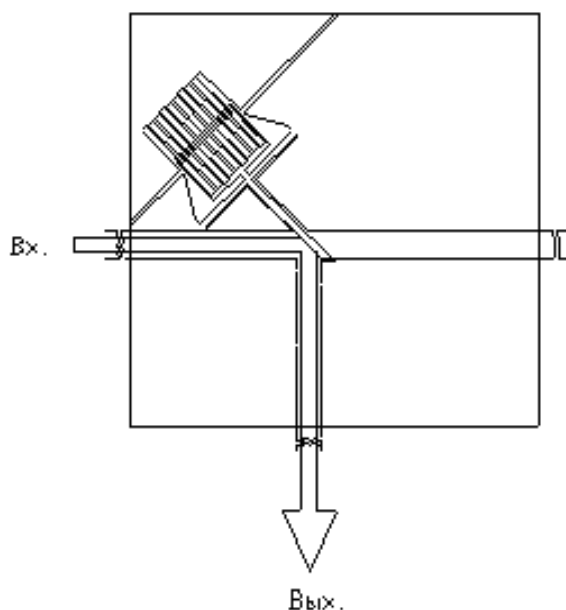


Рис. 4. Схема оптического микрореле

В данном переключателе применен встречно-штыревой преобразователь, диаметр оптического канала составляет $d = 125$ мкм, соответственно, линейное перемещение равно

$\Delta x = 2 \cdot \sqrt{d}$. Такие перемещения можно обеспечить за счет применения данного вида преобразователя и сложной схемы упругих подвесов. Для формирования структуры в кремнии применяется глубинное анизотропное плазмохимическое травление в среде элегаза (SF_6) с автопассивацией кислородом. Высокая скорость травления (1 - 2 мкм/мин.) обеспечивается за счет получения высокоплотной плазмы источником мощностью порядка 1 кВт и ТСП антенной (трансформаторно-связанная плазма). Для формирования зеркальной поверхности кремний после травления подвергается обработке полирующими травителями и последующему осаждению никеля. Соединение подвижной части со стеклянным основанием производится методом анодной сварки. Ячейки оптических переключателей могут быть объединены в матрицы, на которых реализуются переключатели типа «многие-ко-многим».

Данный вид переключателей является неотъемлемой частью при построении широкополосных оптических сетей (когда по одному кабелю передается несущий сигнал на одной и более длин волн). Применение широкополосного метода позволяет на порядки увеличить пропускную способность оптических сетей.

2. Моделирование МЭМС-компонентов

2.1. Использование САПР при моделировании МЭМС-структуры

Моделирование на начальных стадиях разработки позволяет находить оптимальные варианты конструкции, избегать возможности появления дефектов. Также моделирование может частично заменить натурные испытания, особенно это касается разрушающих и дорогостоящих испытаний, при этом нет необходимости производить макетирование. При помощи моделирования различных испытаний можно в короткие сроки проводить обоснованный выбор наиболее подходящего материала. Стремление рассмотреть все более близкие к действительности форму и условия работы конструкции, а также стремление учесть реальные особенности деформирования материала потребовало совершенствования численных методов [2]. Метод конечных элементов (МКЭ), лежащий в основе программного комплекса ANSYS, ориентирован на решение такого рода задач. Своевременное определение мест наибольшей дислокации остаточных напряжений позволило доработать конструкцию и уменьшить их количественное значение.

При разработке МЭМС колебательных систем неизбежно возникает вопрос о расчете резонансной частоты исполнительного механизма. Определение резонансной частоты обусловлено необходимостью обеспечения стабильной работоспособности под воздействием внешних факторов, что исключает появление резонансных частот в заданном частотном диапазоне. При анализе частотных характеристик микромеханических переключающих элементов представляет основной интерес зависимость первой моды колебаний, при которой максимальное отклонение имеет место на рабочем конце колеблющегося элемента – актюатора [3].

С помощью формул удастся определять значения только для простых вариантов геометрии, более сложные конструкции, такие как меандровые участки крепления, спиралевидная или пилообразная форма подвеса – рассчитать при помощи формул не всегда удастся. К тому же по формулам есть возможность расчета только первой моды колебаний.

Основной особенностью колебательных систем с непрерывно распределенной массой является бесконечность числа собственных частот и форм колебаний. С чем связана и особенность математического описания: дифференциальные уравнения в частных производных вместо обыкновенных дифференциальных уравнений. Моделирование позволяет исследовать геометрию, отличную от стандартных (балок, стержней), благодаря чему сокращается время за счет исключения длительного расчета нестандартных форм подвесов. При этом благодаря моделированию удастся получить данные по форме колебания не только первой резонансной частоты, но и последующих. Это обеспечено тем, что для некоторых форм исполнительных механизмов необходимо знать особенности влияния резонанса на присутствие таких эффектов, как кручение, а не простой изгиб.

Моделирование в программе ANSYS позволяет не только определять резонансную частоту для подвеса любой сложности, но и строить зависимости изменения резонансной частоты при внесении принципиальных изменений в конструкцию. Такие результаты помогают выбрать оптимальный вариант конструкции, удовлетворяющий требованиям по стойкости разрабатываемых исполнительных механизмов к воздействию внешних воздействующих механических факторов [4].

2.2. Моделирование микрореле на базе программного комплекса CST STUDIO

На базе программного комплекса CST STUDIO в ходе разработки проводится моделирование ВЧ структур и расчет ВЧ характеристик, до проведения измерений. В основе метода расчета, так же как и для моделирования механических свойств, лежит метод конечных элементов, что позволяет вести расчет сложных 3D структур. Пример модели ВЧ реле показан на рис. 5.

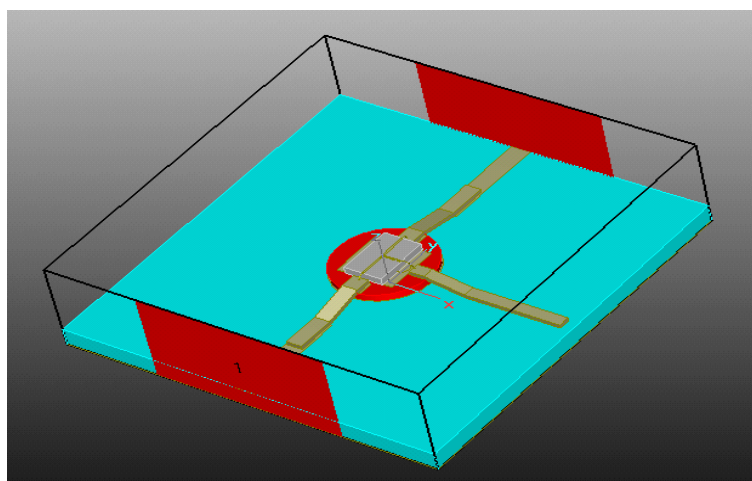


Рис. 5. 3D-модель для расчета в CST STUDIO

На данный момент результаты моделирования и анализа высокочастотных характеристик 3D-структур показывают 80-процентную сходимость с экспериментальными данными, что позволяет широко внедрять использование данного подхода при разработке высокочастотных компонентов.

3. Слаботочные микроэлектромеханические реле с электростатическим принципом управления

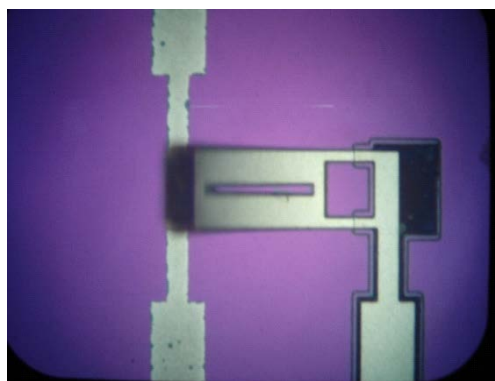


Рис. 6. Фотография слаботочного микроэлектромеханического реле

На рис. 6 показана фотография разработанного в ОАО «СКТБ РТ» слаботочного МЭМС-реле с электростатическим принципом управления. Такая конструкция реле предназначена для коммутации токов до 50 мА и напряжения до 60 В. Напряжение управления составляет порядка 100 В.

Реле изготовлено по поверхностной технологии с применением жертвенного слоя. Подвижная структура сформирована на кремниевой подложке толщиной 450 мкм. Подложка покрыта термическим SiO₂ толщиной 0,3 мкм. Консоль состоит из высокотемпературного PoSi и Al. В качестве жертвенного слоя применялась тонкая пленка SiO₂. Консоль после удаления оксида кремния прогибалась, и начальный зазор в контактной системе составлял от 10 до 15 мкм. Размеры кристалла 1,5x2,2x0,5 мм.

На основе данных, полученных в ходе научно-исследовательской работы, с 2007 года проводится ОКР по созданию серии миниатюрных МЭМС ВЧ реле.

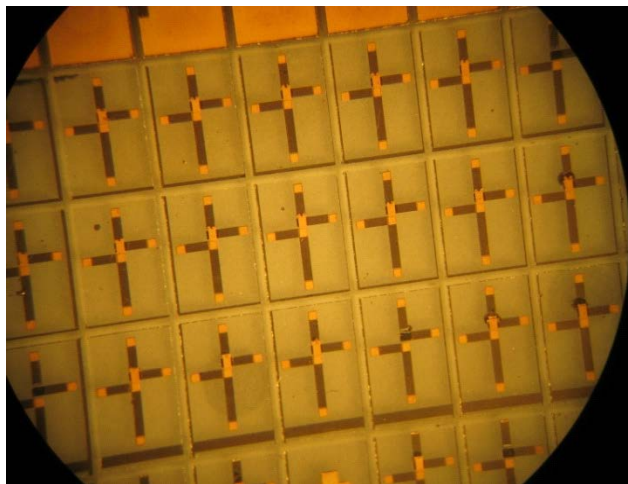
4. Высокочастотные микроэлектромеханические реле с электростатическим принципом управления

Логическим продолжением работ в области слаботочных реле на основе технологий МЭМС стали разработки серий СВЧ микрореле. Широкополосные реле с частотным диапазоном 0 – 6 ГГц стали отправной точкой в развитии номенклатуры СВЧ микрореле на основе МЭМС технологий. В ОАО «СКТБ РТ» ведутся предварительные работы по созданию микрореле на частотный диапазон с еще более широкой полосой 0 – 18 ГГц. Для изготовления ВЧ МЭМС реле также была выбрана поверхностная технология, которая позволяет на базе классических технологий микроэлектроники создавать микромеханические структуры.

Структура ВЧ-реле (РНА 12) изготавливается на подложке Al₂O₃ односторонней полировки. Термовакuumным напылением золота формируется сигнальная линия и управляющие элементы. Подвижная механическая структура, выполненная из двух слоев золота (последовательное термовакuumное и гальваническое осаждение), формирует консоль электростатического актюатора. Зазор в контактной системе обеспечивается жертвенным слоем толщиной от 3 до 5 мкм (в зависимости от варианта конструкции). На контактную систему химическим методом осажден тонкий слой родия, для обеспечения износостойкости поверхностей контактов.

Реле РНА11 в BGA-корпусе представляет собой переключатель с двумя контактными системами. Применение дисковых с тремя опорами исполнительных механизмов позволяет реализовать высоконадежную с точки зрения внешних воздействующих факторов конструкцию микропереключателя.

Реле изготавливаются в керамическом корпусе с планарными выводами – РНА 12 (диаметр корпуса 5 мм), а также в BGA-корпусе с шариковыми выводами – РНА 11 (3x4x1,5 мм). Отдельным исполнением реле могут быть изготовлены в бескорпусном варианте. На рис. 7 показаны фотографии ВЧ МЭМС реле, разработанных в ОАО «СКТБ РТ».



(a)



(б)

Рис. 7. Фотография ВЧ МЭМС реле: а) пластина с кристаллами МЭМС структуры; б) реле РНА 11 (5 шт.), РНА12 (5 шт.) в сборе

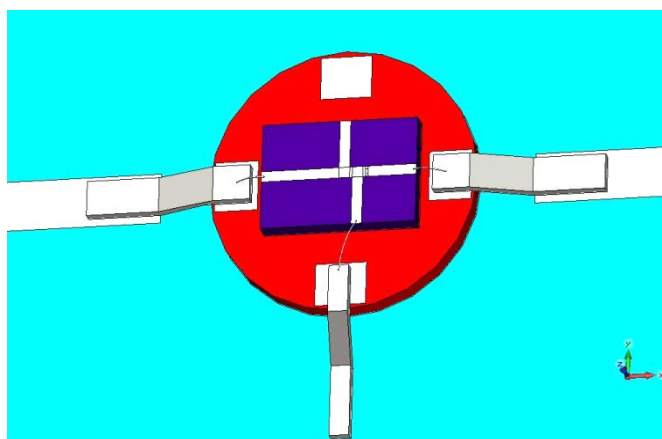


Рис. 8. Схема ВЧ МЭМС реле

На следующем этапе была оптимизирована конструкция реле РНА 12 с технологической точки зрения, что также позволило улучшить высокочастотные характеристики микрореле. Изначально кристалл с МЭМС-структурой отделялся от пластины и клеивался в корпус, что требовало последующей разварки золотой проволоки контактных площадок кристалла и корпуса. В новой конструкции микрореле удалось избежать этой операции благодаря изготовлению корпуса микрореле на основе кристалла МЭМС-структуры. Рамка с выводами методом ультразвуковой сварки соединяется с контактными площадками кристалла, затем на эту структуру приклеивается керамическая крышка.

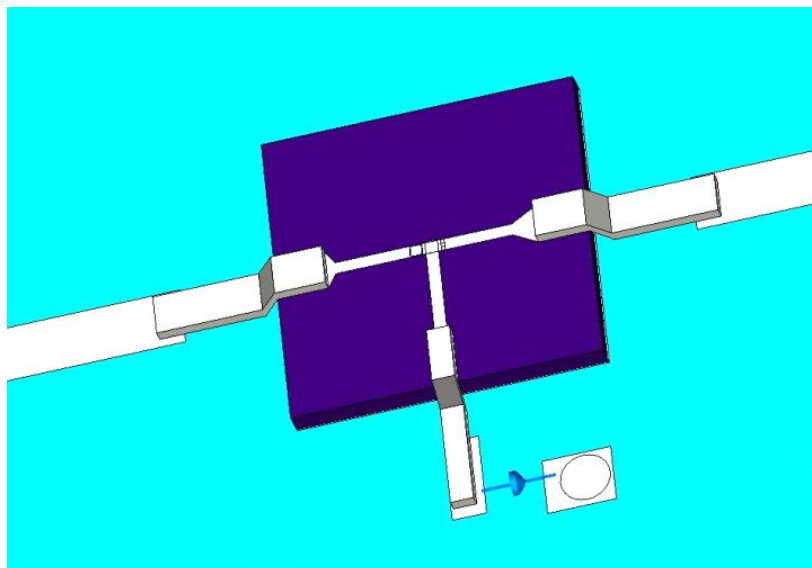
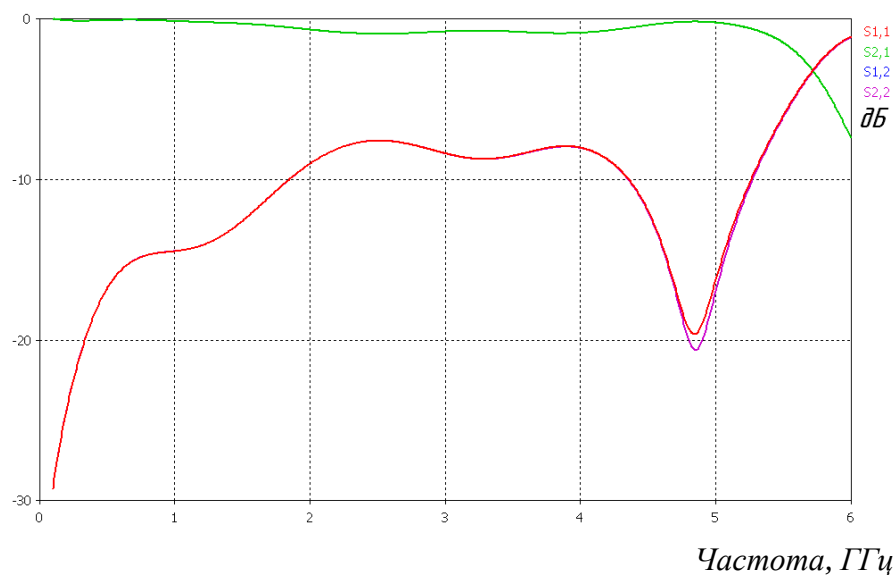


Рис. 9. Схема модернизированного ВЧ МЭМС реле



(a)

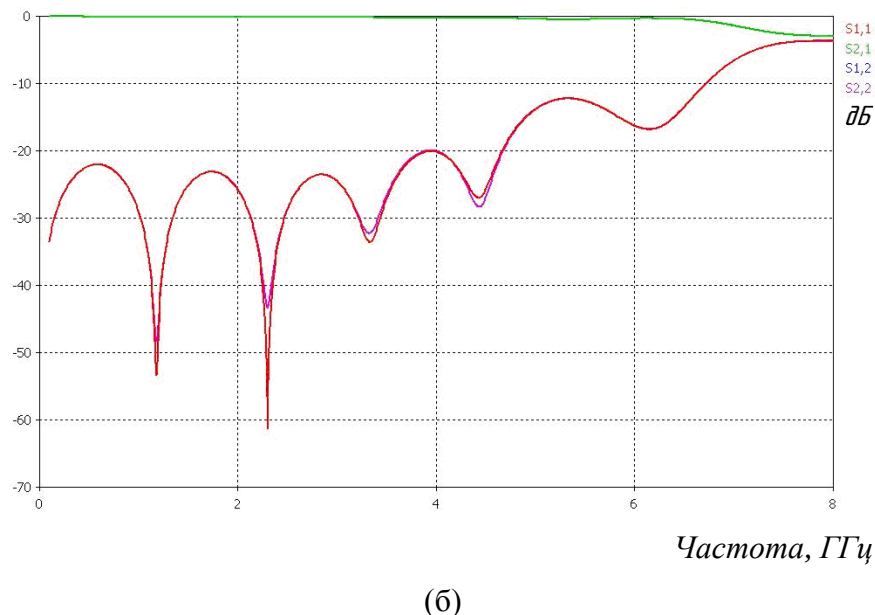


Рис. 10. S-параметры ВЧ-реле (а) и модернизированного ВЧ-реле (б)

Как видно из графиков, изменения конструкции позволили снизить потери в диапазоне от 1 до 5 ГГц, снизить КСВН и расширить рабочий частотный диапазон.

Перспективным частотным диапазоном для ВЧ-реле является 0-18 ГГц. На данный момент проводятся работы по дальнейшей миниатюризации высокочастотных МЭМС-реле, что позволит разработать реле с улучшенными в 2-3 раза массогабаритными характеристиками и в 2 раза большим частотным диапазоном. Дальнейшее уменьшение топологических размеров микрореле позволит сократить время срабатывания с 50 мкс до 5 мкс, с одновременным увеличением ресурса контактной системы микрореле (с 10^6 до $10^9 - 10^{10}$ циклов коммутации). Логичным будет снижение мощности коммутируемого сигнала с 1 Вт до уровня 500 мВт при дальнейшей миниатюризации, однако эти меры позволят применять микрореле при построении систем управления АФАР.

Параметры ВЧ МЭМС реле представлены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры ВЧ МЭМС реле

Наименование параметра	Номинальное значение
Габаритные размеры (без выводов), мм	
С планарными выводами, РНА 12	5x5x1,5
С шариковыми выводами, РНА 11	3x4x1,5
Диапазон коммутируемых частот, ГГц	от 0 до 6
Напряжение срабатывания, В	от 27 до 100
Затухание (контакты замкнуты), дБ	<1,5
Затухание (контакты разомкнуты), дБ	>20
КСВН	<2

Литература

1. Варадан В., Виной К., Джозе К. ВЧ МЭМС и их применение. – Москва: Техносфера, 2004. – 528 с.
2. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы: пер. с англ. – М.: Мир, 1984.
3. Гридчин В.А., Драгунов В.П. Физика микросистем: Учеб. пособие. В 2 ч. Ч. 1. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 416 с.
4. Косолапов И.А. Междисциплинарные связи в многомасштабном моделировании микрооптоэлектромеханических систем. Сборник трудов «Научно-технологические и интеллектуальные системы» – М., Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011.