

И. А. АФИНОГЕНОВ, А. В. КОНЬКИН, П. Б. ЭННС, А. Н. КАПУСТИН

## ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ РЕЛЕ НА БАЗЕ МЭМС-ТЕХНОЛОГИИ

Рассматриваются принципы разработки слаботочных микрореле и микропереключателей для аппаратуры космического применения с использованием технологии микроэлектромеханических систем.

*Ключевые слова:* МЭМС-технология, микропереключатель, микрореле, оптический преобразователь, микросистемная техника.

Снижение массогабаритных, динамических и энергетических параметров коммутационных элементов бортовой аппаратуры космических аппаратов (КА) — неизменно актуальная задача. Инновационным направлением в релейной технике является разработка коммутационных элементов для перспективных КА на базе МЭМС-технологии (объединяющей технологии разработки микроэлектронных и микромеханических устройств). Для разработки компонентов МЭМС (микроэлектромеханических систем) созданы специализированные системы проектирования, с помощью которых реализуются одновременно и механическая, и электрическая части микросистемы.

Благодаря использованию кремния в технологии производства интегральных схем и миниатюрных прецизионных механических систем был разработан новый класс механических мембранных микропереключателей, реализованных на подложке из кремния. Такие электростатические микропереключатели по размерам значительно меньше традиционных

электромагнитных реле и приближаются к размерам ключей на кремниевых транзисторах [см. лит.].

Электростатические микрореле можно подразделить на несколько групп по различным признакам:

- 1) по характеру коммутируемого сигнала:
  - слаботочные;
  - высокочастотные;
  - оптические;
- 2) по виду исполнительного механизма:
  - мембранные;
  - консольные;
  - встречно-штыревые;
- 3) по принципу коммутации:
  - с резистивным контактом (металл—металл);
  - с емкостным контактом (металл—диэлектрик—металл);
  - с отражением сигнала.

Для формирования структур микрореле, в которых перемещения исполнительного механизма составляют единицы микрометров, наиболее подходящими являются мембранные и консольные актюаторы с электростатическим управлением. Такие структуры просты и могут быть выполнены сверхминиатюрными.

Микрореле с резистивным соединением консольного типа (рис. 1) служат для создания омического контакта. Такие реле могут коммутировать как постоянные токи, так и сигналы в СВЧ-диапазоне до 18 ГГц и более. Ресурс таких реле ограничен вследствие износа контактных площадок: в настоящее время при мощности передаваемого сигнала до 50 мВт удается достигнуть 1,5 млн переключений без значительного увеличения сопротивления контактов. В перспективе совершенствование контактной системы позволит достичь 1 млрд переключений.

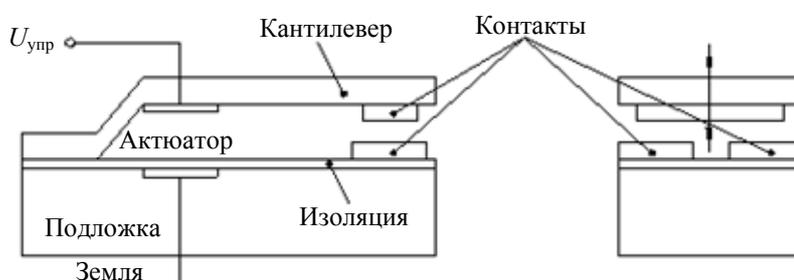


Рис. 1

В микрореле с емкостным соединением мембранного типа (рис. 2) используется эффект различия емкостей во включенном и выключенном состояниях. Применение емкостных ключей не позволяет обеспечить их функционирование на низких частотах. Преимущество таких микрореле — отсутствие омического контакта; ограничением при их использовании является усталостное разрушение мембранного исполнительного механизма.

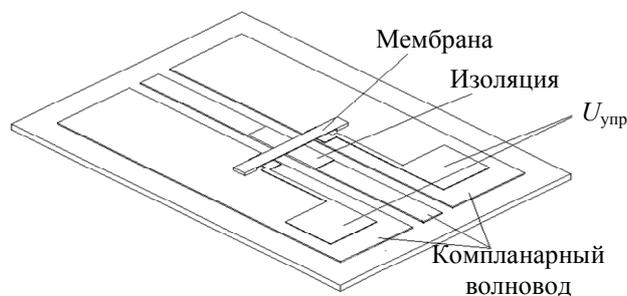


Рис. 2

В особую группу можно выделить оптические микрореле (рис. 3, а). Синергетическая комбинация МЭМС-технологий и оптоэлектроники привела к появлению класса интегрированных микросистем, которые называют микрооптоэлектромеханическими системами. Основой таких реле является подвижная зеркальная поверхность. Механическая часть

оптического переключателя формируется в объеме кремния, что позволяет создавать за одну операцию одновременно актюатор, микрзеркало и каналы для подводящего оптоволокна (рис. 3, б) и упрощает сборку конечного изделия.

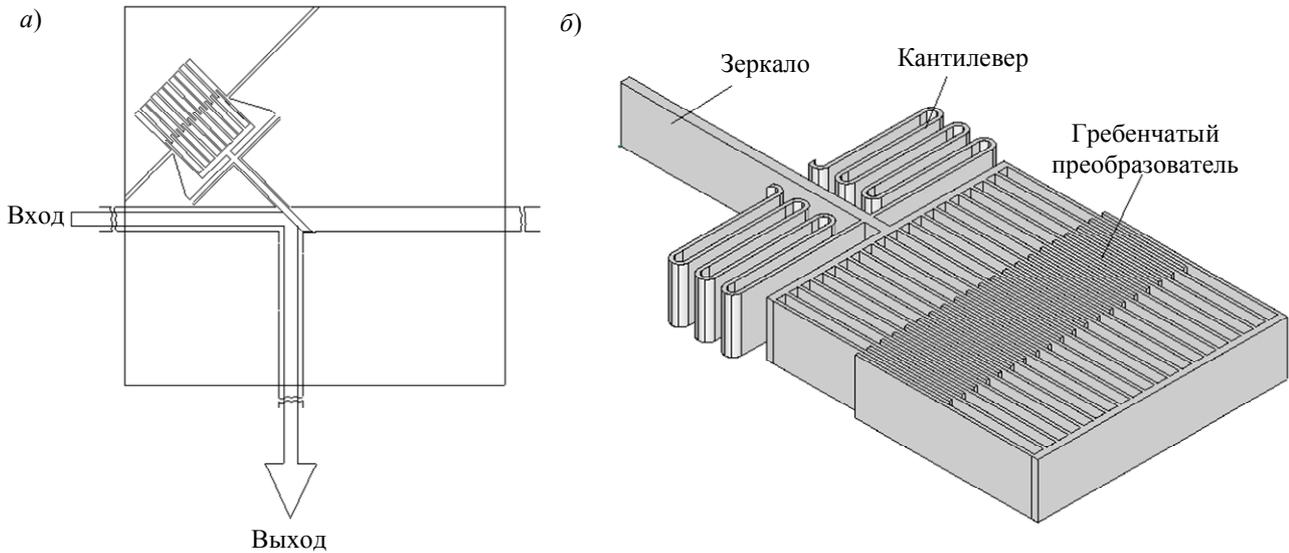


Рис. 3

В разрабатываемом оптическом переключателе применен встречно-штыревой преобразователь с диаметром оптического канала  $d = 125$  мкм и линейным перемещением  $\Delta x = 2\sqrt{d}$ . Такие перемещения можно обеспечить за счет применения сложной схемы упругих подвесов. Для формирования такой структуры применяется глубинное анизотропное плазмохимическое травление кремния в среде элегаза (SF<sub>6</sub>) с автопассивацией кислородом. Высокая скорость травления (1—2 мкм/мин) обеспечивается путем получения высокоплотной плазмы источником мощностью порядка 1 кВт. Для формирования зеркальной поверхности кремний после травления подвергается обработке полирующими травителями с последующим осаждением никеля. Соединение подвижной части переключателя со стеклянным основанием осуществляется методом анодной сварки. Ячейки оптических переключателей могут быть объединены в матрицы, на которых реализуются переключатели типа многие-ко-многим.

Данный вид переключателей используется при построении широкополосных оптических сетей (по одному кабелю передается несущий сигнал на различных длинах волн), что позволяет на порядки увеличить их пропускную способность.

Моделирование оптического переключателя на начальных стадиях разработки позволяет находить оптимальные варианты конструкции и избежать появления дефектов. Также моделирование может частично заменить натурные испытания. Аналитический метод используется при определении параметров простых конструкций. Более сложные конструкции, такие как меандровые участки крепления, спиралевидная или пилообразная форма подвеса, рассчитать не всегда удастся. Кроме того, возможен расчет только первой моды колебаний. Моделирование же позволяет исследовать геометрическую структуру, отличную от стандартных вариантов (балок, стержней), благодаря чему сокращается время расчета. Кроме того, при моделировании можно рассчитать колебания не только первой резонансной частоты, но и последующих. Это обусловлено тем, что для некоторых форм исполнительных механизмов необходимо знать особенности влияния резонанса на такие эффекты, как кручение.

Моделирование в программе “Ansys” позволяет определять резонансную частоту подвеса любой сложности и построить зависимости изменения резонансной частоты не только при варьировании топологии конструкции, но и при ее изменениях. По результатам моделирования выбирается оптимальный вариант конструкции исполнительного механизма, удовлетворяющий

требованиям по стойкости к воздействию внешних механических факторов, что, в свою очередь, позволяет облегчить проектирование МЭМС-устройств.

На базе программного комплекса CST STUDIO было проведено моделирование ВЧ-структур переключателя и расчет его характеристик. В основу расчета, как и при моделировании механических свойств, был положен метод конечных элементов, использование которого позволяет осуществлять расчет и сложных 3D-структур. Результаты моделирования и анализа высокочастотных характеристик 3D-структур обеспечивают 80 %-ную сходимость с экспериментальными данными.

При моделировании микрореле, выполненного на основе электростатического преобразователя, управляющие обкладки могут быть представлены в виде плоского конденсатора, в котором силы притяжения равномерно распределены по его эффективной площади. В этом случае силу  $F_{ст}$ , действующую на подвижную консоль (мембрану), можно рассчитать по формуле

$$F_{ст} = \frac{\epsilon_0 A U^2}{2q^2},$$

где  $U$  — напряжение, прикладываемое к обкладкам конденсатора;  $A$  — эффективная площадь конденсатора,  $q$  — зазор между его обкладками;  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость материала.

Условие „падения“ консоли (мембраны) под действием напряжения управления определяется как

$$F_{упр} \leq F_{ст} \text{ при } x = q_0/3,$$

где  $q_0$  — величина первоначального зазора,  $x$  — смещение, и устанавливается на уровне, составляющем  $2/3$  от начального зазора, при котором система становится нестабильной, и мембрана резко падает на нижнюю пластину (согласно графику зависимости величины зазора от приложенного напряжения [см. лит.]).

На рис. 4 представлен график зависимости изменения величины зазора от приложенного напряжения для микрореле с напряжением срабатывания 100 В и напряжением отпускания на уровне 40—50 В.

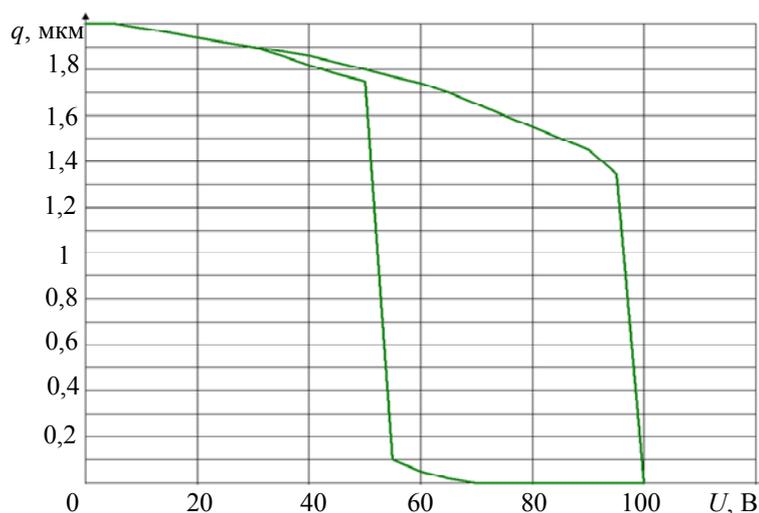


Рис. 4

Для разработанной конструкции микрореле электростатическая сила в начальный момент времени (при  $q_0$ ) меньше, чем в конце переключения (при  $q=0$ ) приблизительно в 44,5 раза.

Если необходимо снизить напряжение управления, можно использовать конструкцию микрореле, в котором диапазон перемещений механической структуры находится в зоне

стабильности: см. рис. 5, где *а* — микрореле при  $q = 0,6$  мкм, разомкнуто; *б* — микрореле при  $q = 0,6$  мкм, замкнуто; *в* — микрореле при  $q = 1,3$  мкм, разомкнуто; *г* — микрореле при  $q = 1,3$  мкм, замкнуто. При начальном зазоре в 2 мкм максимально возможное перемещение консоли (мембраны) составляет 0,5—0,7 мкм.

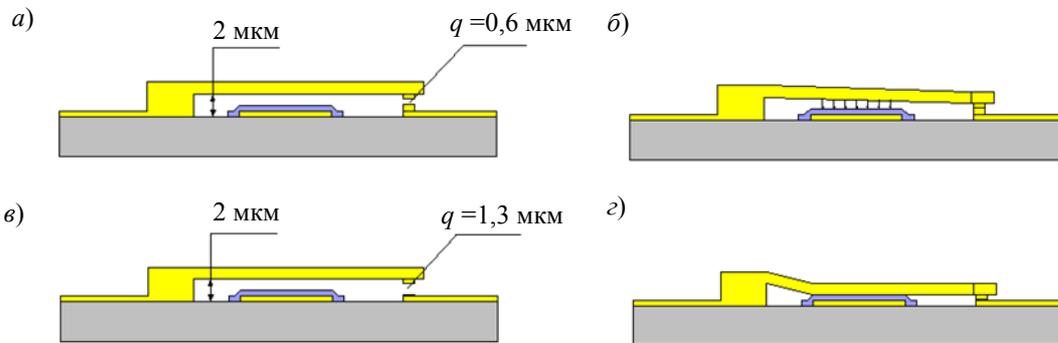


Рис. 5

Уменьшению величины зазора в слаботочных микрореле в разомкнутом режиме препятствует значение коммутируемого напряжения, так как при достаточно малых зазорах и больших напряжениях возможен пробой межконтактного пространства.

Немаловажным критерием выбора величины начального зазора в контактной системе является ударостойкость. Так, под воздействием ударов в 150g длительностью 3 мс максимальный прогиб консольной структуры микрореле составил 3,90 мкм, а мембранной механической системы — 0,37 мкм. Данные результаты показывают, что консольная структура может иметь несанкционированные срабатывания при ударных воздействиях: это не позволит избежать замыканий без изменения величины начального зазора или топологических размеров. Другая ситуация наблюдается при механической структуре, основанной на двухопорной мембране. Устойчивость к ударным воздействиям и величина прогиба свидетельствуют не только об отсутствии несанкционированных срабатываний, но и о возможности увеличения высоты нижних контактов, что позволяет формировать механическую структуру, работающую в зоне стабильности с узкой петлей гистерезиса по напряжению управления.

В ОАО „СКТБ релейной техники“ (Великий Новгород) разработано слаботочное МЭМС-реле с электростатическим принципом управления, предназначенное для коммутации токов до 50 мА и напряжения до 60 В, напряжение управления — порядка 100 В. Реле изготовлено по поверхностной технологии с применением жертвенного слоя. Подвижная структура сформирована на кремниевой подложке толщиной 450 мкм. Подложка покрыта термическим слоем  $\text{SiO}_2$  толщиной 0,3 мкм. Консоль состоит из высокотемпературного сплава  $\text{PoSi}$  и  $\text{Al}$ . В качестве жертвенного слоя применена тонкая пленка  $\text{SiO}_2$ . Консоль после удаления оксида кремния прогибалась, и начальный зазор в контактной системе составлял от 10 до 15 мкм. Размеры кристалла  $1,5 \times 2,2 \times 0,5$  мм.

Продолжением работ по созданию слаботочных реле на основе МЭМС-технологии стала разработка серии СВЧ-микрореле. Для их изготовления также была выбрана поверхностная технология, базирующаяся на классических технологиях микроэлектроники. Так, было разработано ВЧ-реле (РНА 12), которое изготавливается на подложке из  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с односторонней полировкой. Термовакuumным напылением золота формируются 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. На контактную систему химическим методом осажден тонкий слой родия, предназначенный для обеспечения износостойкости поверхностей контактов.

Реле изготавливаются в керамическом корпусе с планарными выводами (РНА 12), а также в BGA-корпусе с шариковыми выводами (РНА 11). Последнее представляет собой переключатель с двумя контактными системами. Применение дисковых с тремя опорами исполнительных механизмов позволяет реализовать высоконадежную к воздействию внешних факторов конструкцию микропереключателя. Реле могут быть выполнены и в бескорпусном варианте.

Характеристики высокочастотных МЭМС-реле представлены ниже.

Габаритные размеры (без выводов), мм:	
с планарными выводами .....	5,0×5,0×1,5
с шариковыми выводами .....	3,0×4,0×1,5
Диапазон коммутируемых частот, ГГц.....	0—6
Напряжение срабатывания, В .....	27—100
Затухание (контакты замкнуты), дБ, менее .....	1,5
Затухание (контакты разомкнуты), дБ, более .....	20
КСВн, менее .....	2

Для ВЧ-реле перспективным частотным диапазоном является 0—18 ГГц. В настоящее время проводятся работы по дальнейшей миниатюризации реле, что позволит изготавливать реле с улучшенными в 2—3 раза массогабаритными характеристиками и в 2 раза большим частотным диапазоном. В перспективе уменьшение топологических размеров микрореле позволит сократить время срабатывания с 50 до 5 мкс с одновременным увеличением ресурса контактной системы микрореле ( $10^9$ — $10^{10}$  циклов коммутации); логичным будет снижение мощности коммутируемого сигнала до уровня 500 мВт.

#### ЛИТЕРАТУРА

*Варадан В., Виной К., Джозе К.* ВЧ МЭМС и их применение. М.: Техносфера, 2004. 528 с.

#### *Сведения об авторах*

- Иван Анатольевич Афиногенов** — ОАО „СКТБ релейной техники“, Великий Новгород; инженер-конструктор E-mail: [torrp2001@yandex.ru](mailto:torrp2001@yandex.ru)
- Александр Владимирович Конькин** — ОАО „СКТБ релейной техники“, Великий Новгород; инженер-конструктор
- Павел Борисович Эннс** — ОАО „СКТБ релейной техники“, Великий Новгород; инженер-технолог
- Александр Николаевич Капустин** — ОАО „Информационные спутниковые системы“ им. акад. М. Ф. Решетнёва, Железногорск, Красноярский край; нач. отдела; E-mail: [kapustin@iss-reshetnev.ru](mailto:kapustin@iss-reshetnev.ru)

Рекомендована ОАО „ИСС“

Поступила в редакцию  
19.11.10 г.