

ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. К. А. ВАЛИЕВА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК



*Посвящается 35-летию
Физико-технологического института им. К.А. Валиева
Российской академии наук*

ТРУДЫ **ФТИАН**

Основаны в 1991 году
Главный редактор
член-корреспондент РАН В.Ф. ЛУКИЧЁВ

МОСКВА НАУКА 2024

ТРУДЫ
ФТИАН

Том 32

**КВАНТОВЫЕ КОМПЬЮТЕРЫ,
МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА**
физика, технология, диагностика
и моделирование

Ответственный редактор
доктор физико-математических наук
К.В. РУДЕНКО

Рецензенты:

*член-корреспондент РАН В.Ф. Лукичёв,
доктор технических наук П.П. Мальцев*

Труды Физико-технологического института / гл. ред. В.Ф. Лукичёв ; Физико-технологич. ин-т им. К.А. Валиева РАН. — М. : Наука, 1991 — . — ISSN 0868-7129.

Т. 32: Квантовые компьютеры, микро- и наноэлектроника : физика, технология, диагностика и моделирование / отв. ред. К.В. Руденко. — 2024. — 483 с. — ISBN 978-5-02-041043-5.

Том 32 Трудов ФТИАН посвящен 35-летию Института и предваряется кратким очерком истории становления и развития Института как ведущей научной организации в области микро- и наноэлектроники, твердотельных устройств для квантовых вычислений. Сборник содержит результаты по актуальным научным направлениям, полученным лабораториями как Физико-технологического института им. К.А. Валиева РАН, так и Ярославского филиала ФТИАН. Представлены работы в области квантовых вычислений, физики и технологии приборов наноэлектроники, МЭМС, изготовления микро- и наноструктур, моделирования приборов и технологических процессов.

Для широкого круга специалистов в области квантовых информационных технологий, микро- и наноэлектроники, а также студентов и аспирантов, обучающихся по соответствующим специальностям.

ISBN 978-5-02-041043-5

- © Физико-технологический институт им. К.А. Валиева РАН, 2024
- © Российская академия наук и издательство «Наука», продолжающееся издание «Труды ФТИАН» (разработка, оформление), 1991 (год основания), 2024
- © ФГБУ Издательство «Наука», редакционно-издательское оформление, 2024

УДК 621.318.51, 621.3.049.7

И.В. УВАРОВ, И.А. БЕЛОЗЕРОВ, А.Н. КУПРИЯНОВ, Д.Э. ПУХОВ,
Л.А. МАЗАЛЕЦКИЙ, В.В. НАУМОВ, О.М. КОРОЛЕВА, Е.И. ВАГАНОВА,
М.О. ИЗЮМОВ, И.И. АМИРОВ

УСТРОЙСТВА КОММУТАЦИИ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ МЭМС

Ярославский филиал Физико-технологического института им. К.А. Валиева РАН

Переключатели, изготовленные по технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС), рассматриваются в качестве основы перспективной элементной базы систем связи и радиолокации. В работе представлены результаты исследования МЭМС-переключателя с электростатическим управлением и резистивным контактом. Особенностью устройства является механизм активного размыкания, защищающий контакты от залипания. Переключатель обладает напряжением срабатывания 27 В, что в несколько раз ниже рабочего напряжения коммерчески доступных изделий. Контактное усилие составляет 112 мкН при управляющем напряжении 100 В. Ключ изготавливается с контактами из золота, платины и рутения. Устройство на основе Pt-Pt демонстрирует нестабильное сопротивление вследствие образования фрикционных полимеров. Контакт Ru-Ru обеспечивает более стабильное сопротивление и длительный срок службы по сравнению с платиной. Ключ на основе Au-Ru обладает наиболее низким сопротивлением, в среднем составляющим 60–80 Ом. Минимальная зарегистрированная величина составляет 20 Ом. Устранение контаминации золота путем корректировки процесса травления жертвенного слоя обеспечит сопротивление ниже этого уровня.

1. Введение

Переключатели, изготовленные по технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС), рассматриваются в качестве альтернативы традиционно применяемым электромагнитным и полупроводниковым реле [1]. Малые размеры и вес, низкое энергопотребление, хорошая изоляция и малые вносимые потери и делают МЭМС-переключатели перспективными для использования в передовых радиоэлектронных системах, включая сети связи пятого поколения [2–4], адаптивные антенны [5–8], авиационную и космическую технику [9, 10].

Существуют переключатели с различными принципами управления, в том числе электромагнитным, пьезоэлектрическим, термическим и инерционным, однако наиболее распространенным является электростатический принцип действия [11, 12]. Электростатические МЭМС-ключи изготавливаются стандартными методами микроэлектроники, что дает возможность формировать их совместно с интегральными схемами [13, 14]. Объединение нескольких ключей на одном чипе позволяет создавать миниатюрные перестраиваемые устройства, такие как фазовращатели [15–17], фильтры [18, 19], аттенюаторы [20–22] и усилители [23, 24].

Исследования в области МЭМС-переключателей продолжаются более трех десятилетий, но эти устройства до сих пор не нашли широкого применения вследствие недостаточно высокой надежности. МЭМС-переключатели делятся на два класса: с емкостным и резистивным контактом. Резистивные ключи формируют контакт металл-металл и являются более предпочтительными для многих приложений, поскольку способны коммутировать сигналы в более широкой полосе частот. Основной причиной выхода омического переключателя из строя является износ контактов. Металлические поверхности деградируют вследствие трения, контаминации и ряда других причин, подробно рассмотренных в обзорных работах [25, 26]. Деградация приводит к увеличению контактного сопротивления или залипанию. Проблема хорошо осознается в сообществе МЭМС, поэтому предлагаются различные способы ее решения. К ним относятся: помещение ключа в атмосферу чистого газа [27, 28], плазменная очистка контактов [29–31], подбор количества и размеров контактных выступов [32–34] и устранение дребезга [35–37]. Также реализуется двухступенчатая коммутация [38–40] и смещение точки контакта [41].

Наряду с перечисленными методами важную роль в увеличении срока службы контактов и уменьшении сопротивления играет выбор материала. Поведение материалов обычно исследуется с помощью специальных стендов на основе индентеров [42–44], сканирующих зондовых микроскопов [45, 46] и самодельных приводов [47–51], имитирующих работу контактов в различных режимах. Среди множества металлов золото дает наименьшее контактное сопротивление. Малое сопротивление сохраняется даже при небольшой силе прижима порядка 10 мкН. Причиной является высокая проводимость Au и устойчивость к образованию поверхностных оксидных пленок и контаминации. Однако золотые контакты склонны к механическому износу и залипанию вследствие невысокой твердости и температуры плавления. Альтернативой золоту служат более твердые благородные металлы, такие как платина, рутений, родий и иридий. Rh и Ir имеют наиболее высокую стоимость, но не имеют заметного преимущества перед Pt и Ru по характеристикам контактов. В целом, несмотря на существенный объем проведенных исследований, оптимальный материал до сих пор не найден. Выбор зачастую определяется особенностями технологии изготовления конкретного изделия.

В настоящей работе представлены результаты сравнительного исследования контактов из Au, Pt и Ru. Исследование выполнено с помощью МЭМС-переключателя электростатического типа, оснащенного механизмом активного размыкания. Представлены основные характеристики переключателя, технология его изготовления, методика и результаты испытаний.

1. Материалы и методы исследований

МЭМС-переключатель схематично изображен на рис. 1, *а*. Подвижным электродом служит металлическая балка длиной 100 мкм, закрепленная на торсионных подвесах. Под каждым ее плечом располагаются управляющий и коммутируемый электроды. На нижней стороне балки находятся контактные выступы. Они локализуют область контакта и не позволяют балке соприкасаться с электродами управления. Такая конфигурация позволяет отказаться от диэлектрического покрытия, подверженного эффекту зарядки. Замыкание контактов осуществляется путем подачи напряжения на один из управляющих электродов. Балка наклоняется под действием электростатической силы и вступает в контакт с коммутируемым электродом, как показано на рис. 1, *б*. При отключении напряжения сила упругости подвесов возвращает ее в исходное положение. Таким же образом замыкается противоположная пара контактов, т. е. ключ осуществляет двустороннюю коммутацию. Если сила упругости недостаточно велика для преодоления адгезии между контактным выступом и электродом, то для размыкания контакта напряжение подается на противоположный управляющий электрод. Таким образом создается дополнительная сила, позволяющая преодолевать залипание. Представленный механизм активного размыкания имеет ряд преимуществ по сравнению с другими вариантами защиты от залипания [52].

Переключатель изготавливался методом поверхностной микрообработки на термически окисленных кремниевых пластинах диаметром 100 мм. Основные этапы процедуры изготовления показаны на рис. 2. Первым этапом на пластине формировался изолирующий слой SiO_2 толщиной 1 мкм методом термического окисления кремния во влажном кислороде. Далее с помощью взрывной фотолитографии на этом слое изготавливались управляющие и коммутируемые электроды толщиной 100 нм, а также линии, соединяющие электроды с контактными площадками. В качестве материала электродов использовались Au, Pt, Ru. Для улучшения адгезии этих металлов к SiO_2 применялся слой титана толщиной 10 нм. Затем на пластину методом магнетронного распыления наносился жертвенный слой аморфного кремния толщиной 1.5 мкм. С помощью плазменного травления через маску фоторезиста ФП-3515 в нем выполнялись окна для последующего формирования анкеров и дополнительной металлизации сигнальных линий (этап 2). Затем создавались контактные выступы (этап 3). Для этого в жертвенном слое методом плазменного травления выполнялись ямки глубиной 0.5 мкм, которые впоследствии заполнялись материалом контактов (Pt, Ru). На следующем этапе формировалась армирующая структура балки (этап 4). На пластину методом магнетронного распыления наносилась пленка алюминия толщиной 1 мкм, выполнялись фотолитография и жидкостное травление. Этим же методом формировались алюминиевая балка, подвесы, опоры и металлизация сигнальных линий (этап 5). Таким образом, подвесы и опоры имели толщину 1 мкм, в то время как балка состояла из двух слоев алюминия суммарной толщиной 2 мкм. На заключительном этапе изготовления осуществлялось удаление жертвенного слоя методом изотропного травления в плазме SF_6 (этап 6). С целью сокращения времени травления балка оснащалась отверстиями перфорации.

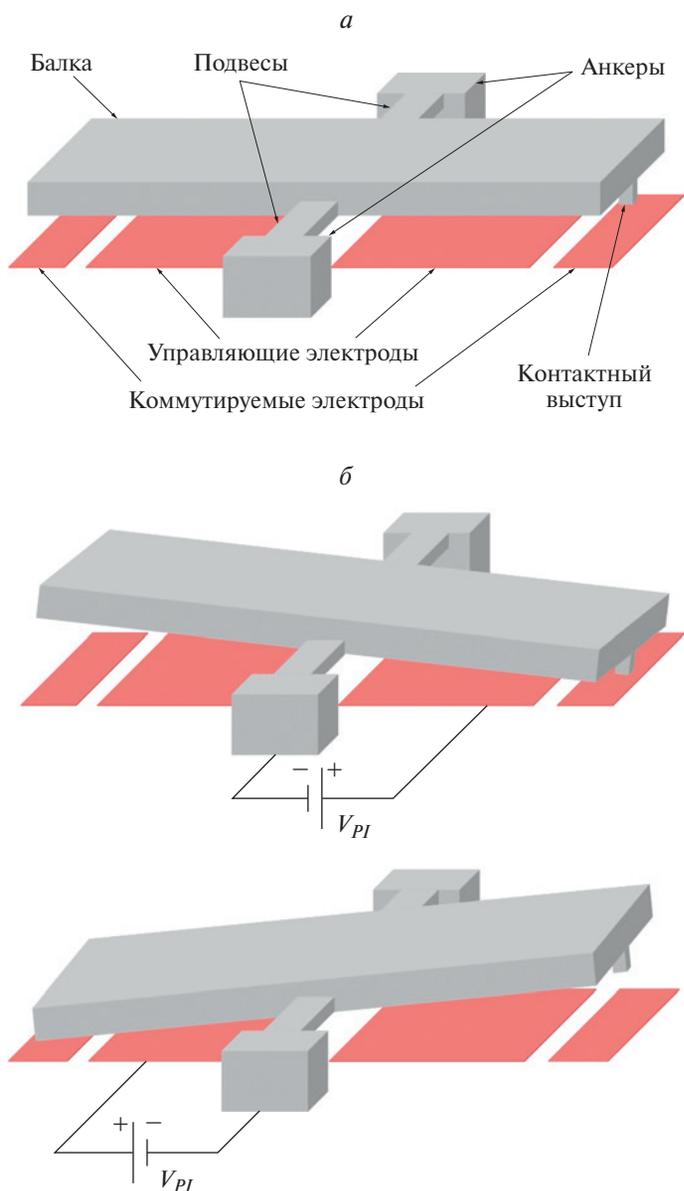


Рис. 1. Схематичное изображение МЭМС-переключателя: *a* – общий вид с указанием основных элементов, *б* – рабочие состояния

На пластине размещались 32 чипа, как показано на рис. 3, *a*. После прохождения всех этапов техпроцесса она разделялась на чипы методом раскалывания по кристаллографическим осям. Фотография отдельного чипа приведена на рис. 3, *б*. Он имел латеральный размер 10×10 мм и содержал 4 переключателя. СЭМ-изображение переключателя представлено на рис. 4. Ключ изготавли-

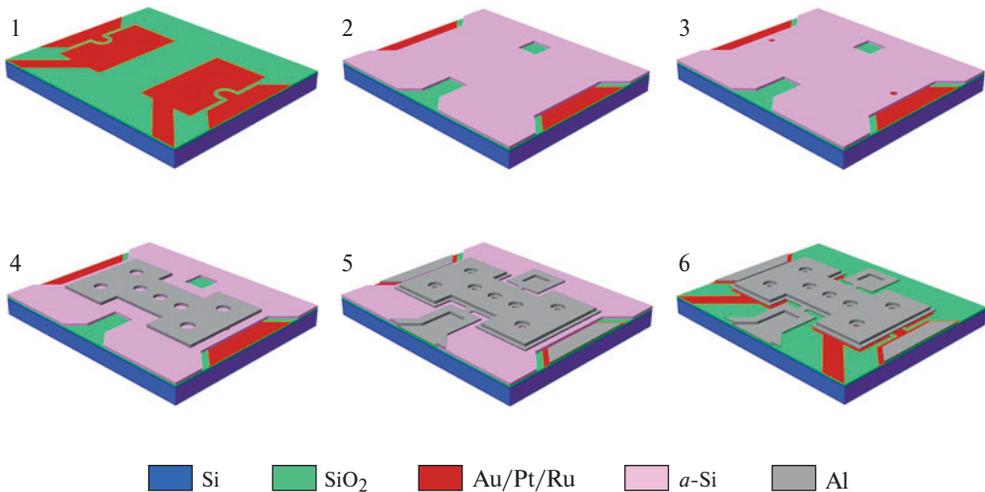


Рис. 2. Основные этапы процедуры изготовления переключателя

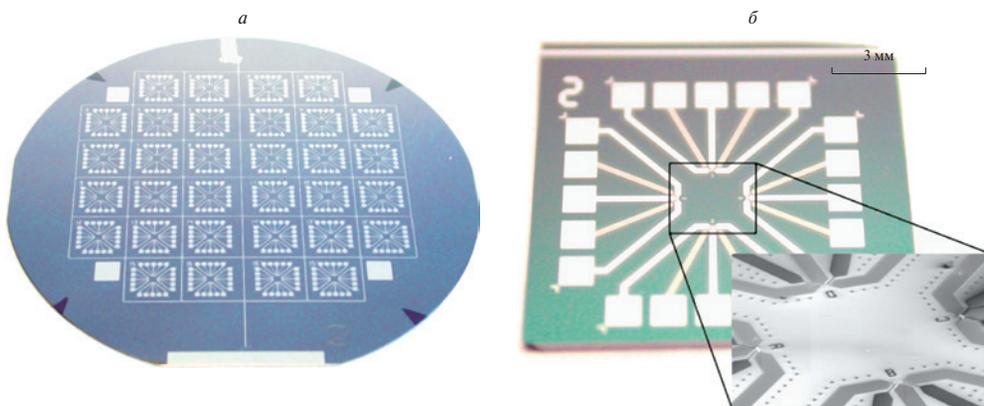
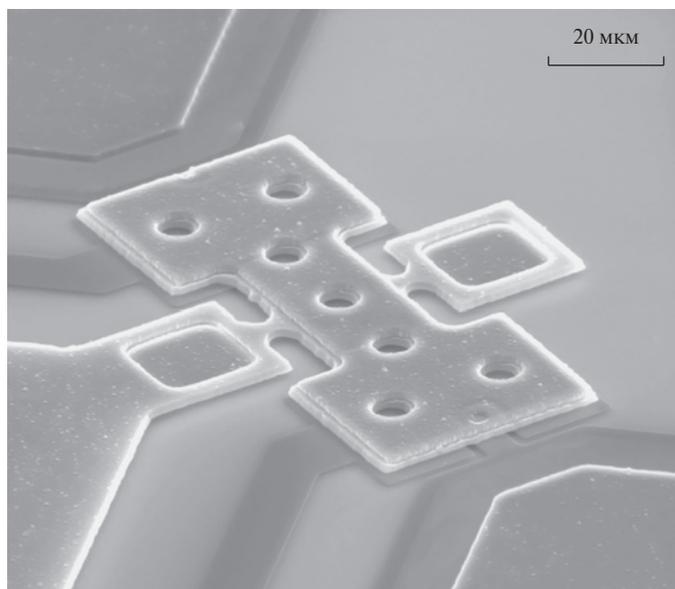


Рис. 3. Фотографии изготовленных образцов: *a* – пластина диаметром 100 мм до разделения на чипы; *б* – отдельный чип

вался в двух вариантах, имеющих один и два контактных выступа с каждой стороны балки. Двухконтактное устройство выдерживало большее управляющее напряжение, поскольку в замкнутом положении балка была более устойчива к скручиванию вокруг продольной оси. В обоих случаях форма электродов отличалась от стандартной конфигурации, показанной на рис. 1. Управляющий электрод огибал коммутируемый и имел увеличенную ширину. Балка также была расширена в области перекрытия с электродами. Длина электрода, напротив, была уменьшена, т. е. электрод был смещен ближе к контактам. Такая компоновка увеличивала зону действия электростатической силы и перераспределяла ее в пользу контактов.

Рабочие характеристики переключателя рассчитывались методом конечных элементов с помощью широко известного программного обеспечения. Модель

a



б

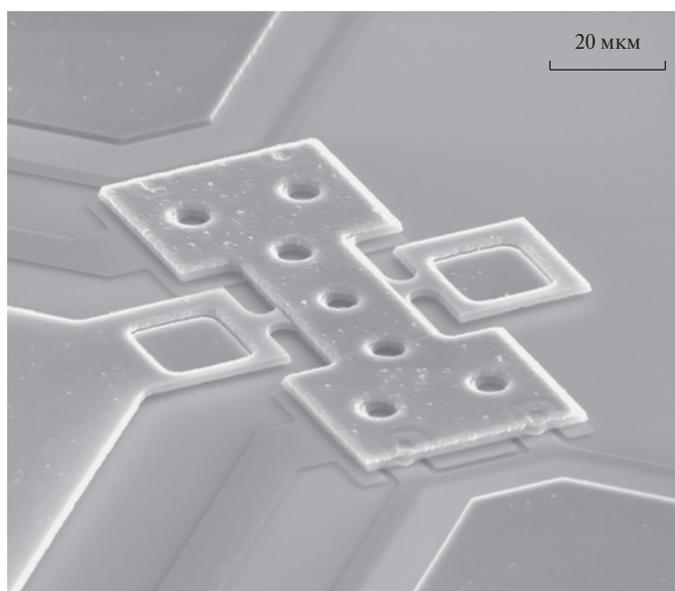


Рис. 4. СЭМ-изображение переключателя в разных исполнениях: *a* – балка имеет один контактный выступ с каждой стороны; *б* – с каждой стороны имеются два выступа

включала в себя балку с подвесами, а также управляющий и коммутируемый электроды, и содержала 166 000 конечных элементов тетраэдрической формы. Разбиение модели на элементы показано на рис. 5. В первую очередь определялось напряжение срабатывания. Балка и коммутируемый электрод были

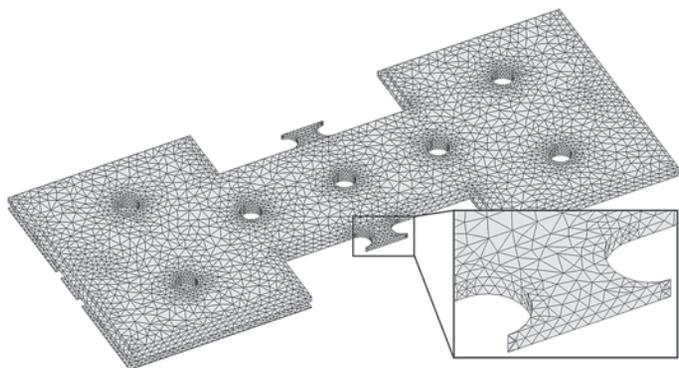


Рис. 5. Модель переключателя с сеткой конечных элементов

заземлены, а на управляющий электрод подавался электрический потенциал. Зависимость расстояния между контактным выступом и коммутируемым электродом от величины потенциала представлена на рис. 6. С ростом потенциала расстояние уменьшалось, и по достижении напряжения срабатывания V_{PI} наблюдалось резкое сокращение зазора (электростатическое схлопывание, pull-in). Срабатывание происходило при напряжении 27 В, когда зазор составлял около 0.4 мкм. Переключатель стандартной конфигурации обладал напряжением срабатывания 45 В. Таким образом, оптимизация формы электродов на 40% снизила напряжение, необходимое для управления переключателем.

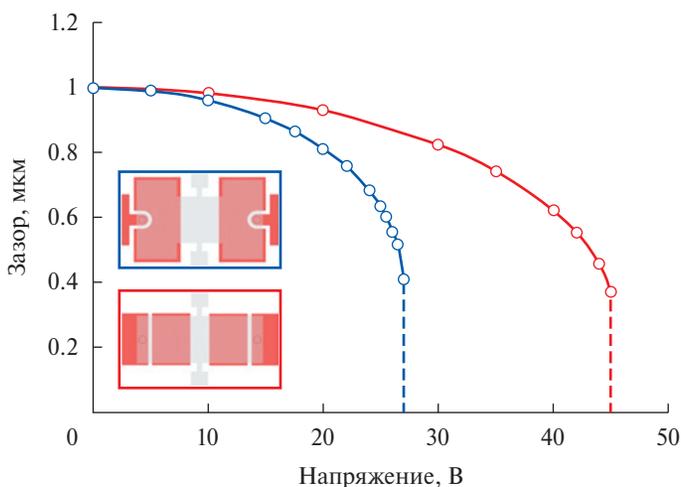


Рис. 6. Зависимость зазора между контактным выступом и коммутируемым электродом от управляющего напряжения. Пояснения см. в тексте

Зависимость контактного усилия, приходящегося на один выступ, от управляющего напряжения представлена на рис. 7. Она была получена путем аналитических расчетов и подтверждена методом конечных элементов [53]. В последнем случае решалась задача контакта двух тел. Одноконтактный пере-

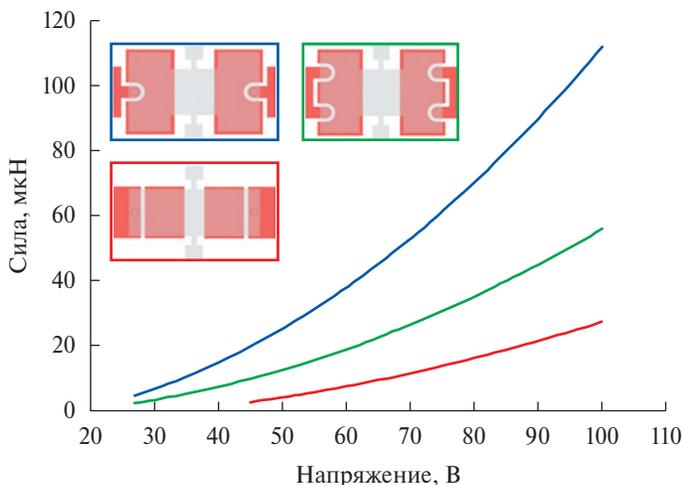


Рис. 7. Зависимость удельной силы прижима от управляющего напряжения

ключатель развивал силу прижима от 5 до 112 мкН при управляющем напряжении от 27 до 100 В. Усилие в 100 мкН достигалось при напряжении 95 В. Оптимизация формы электродов в 4–7 раз увеличила силу прижима по сравнению со стандартным изделием. Стоит отметить, что двухконтактный ключ развивал вдвое меньшую удельную силу по сравнению с одноконтактной версией, поскольку усилие распределялось между двумя выступами. В целом диапазон силы прижима был достаточно широк и позволял исследовать работу контактов в различных режимах.

Рабочие характеристики переключателя измерялись в воздухе при нормальных условиях, образцы не корпусировались. Эксперимент выполнялся с помощью специального стенда, осуществляющего подачу управляющего и входного напряжений, регистрацию выходного напряжения и первичную обработку экспериментальных данных. Стенд был оснащен длиннофокусным оптическим микроскопом Mitutoyo FS70, позволяющим визуально контролировать состояние тестируемого переключателя. Схема подключения измерительных приборов к образцу представлена на рис. 8. Входной сигнал (source voltage, V_S) подавался от источника питания постоянного тока Agilent E3647A. Источником управляющего напряжения (gate voltage, V_{G1} и V_{G2}) служила плата ввода-вывода National Instruments PCI-6221, встроенная в персональный компьютер. Ее сигнал усиливался в 20 раз с помощью специально изготовленного усилителя мощности класса АВ и подавался на управляющие электроды. Эта же плата регистрировала выходное напряжение (drain voltage, V_{D1} и V_{D2}). Управляющие и выходные сигналы контролировались осциллографом Keysight DSOX2024A.

Управление приборами осуществлялось в автоматическом режиме с помощью программного обеспечения, написанного в среде LabView. На управляющие электроды подавались прямоугольные импульсы напряжения таким образом, чтобы каналы срабатывали поочередно с частотой 4 Гц. Амплитуда импульсов составляла от 40 до 100 В и превышала напряжение срабатывания, гарантируя уверенное переключение. Ключ работал в холодном режиме.

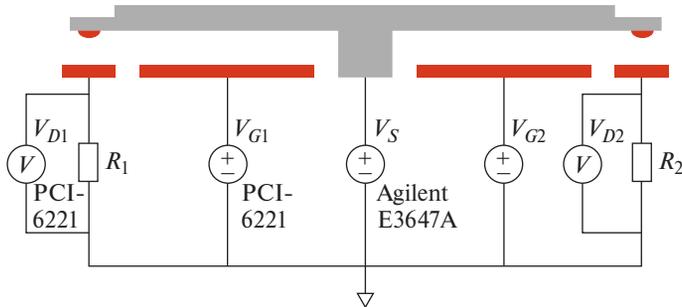


Рис. 8. Схема подключения измерительных приборов к переключателю

Входное напряжение включалось через 20 мс после замыкания контактов и отключалось за 20 мс до размыкания. Тестирование образцов выполнялось при $V_S = 5$ В. Ток, протекающий через контакты, был ограничен величиной 1 мА за счет нагрузочных резисторов R_1 и R_2 сопротивлением 5 кОм, установленных в выходные каналы. Таким образом, коммутируемая мощность составляла 5 мВт. Контактное сопротивление измерялось на каждом рабочем цикле с помощью резистивного делителя, содержащего это сопротивление и нагрузочный резистор.

2. Результаты и обсуждение

Первым этапом были испытаны двухконтактные переключатели. Типовая зависимость контактного сопротивления R_C от числа циклов коммутации представлена на рис. 9, а. Изделие с контактами Pt-Pt демонстрировало весьма нестабильное R_C . Оно изменялось от 66 до 619 Ом и имело среднее значение 281 Ом. Рутениевые контакты обеспечивали более стабильное сопротивление 76–199 Ом со средним значением 157 Ом, что на 44% ниже по сравнению с платиной. Нестабильность была обусловлена накоплением углеродсодержащих загрязнений на поверхности контактов, что было показано в работе [54]. Контаминация с образованием фрикционных полимеров характерна для металлов платиновой группы и объясняется их электронной структурой [55]. Платина адсорбирует углерод из окружающей среды и образует нелетучие углеродные соединения [56]. В отличие от платины, поверхность рутения подвержена окислению. Пленка RuO_2 препятствует накоплению углерода [57]. Вероятно, формирование оксидной пленки в ходе изготовления являлось причиной более стабильного сопротивления на начальном этапе тестирования.

В дальнейшем скачки R_C наблюдались и на контактах Ru-Ru, как показано на рис. 9, б. Переключатели выходили из строя вследствие резкого увеличения сопротивления до нескольких мегаом. Контакты из платины имели срок службы менее $4 \cdot 10^4$ циклов, в то время как ключи на основе рутения выдерживали свыше $1.8 \cdot 10^6$ срабатываний. Более высокая надежность Ru контактов была обусловлена меньшей склонностью к контаминации и высокой твердостью этого металла.

Интерес представляло испытание переключателя при разных значениях контактного усилия F_C . Сила устанавливалась согласно графику, показанному

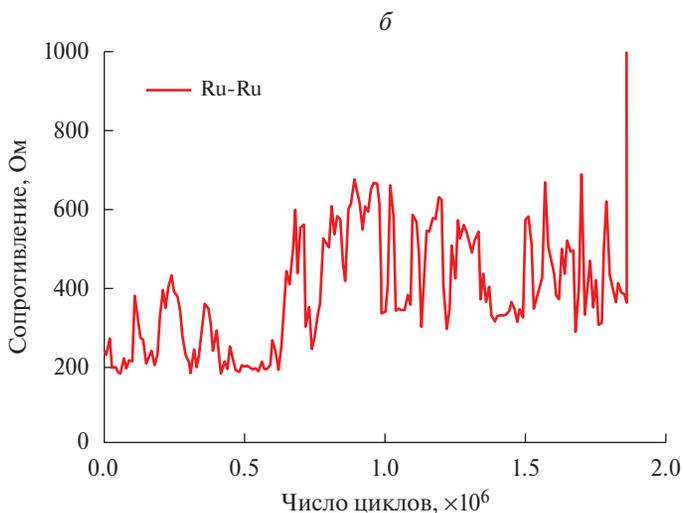
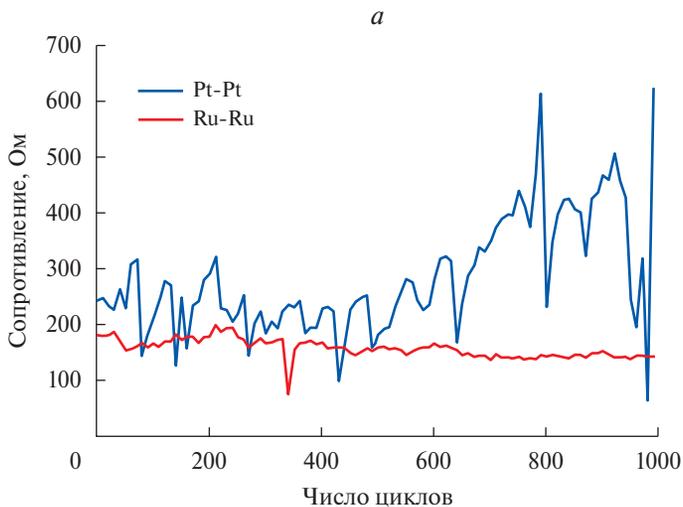


Рис. 9. Зависимость сопротивления двухконтактных переключателей от числа рабочих циклов: *a* – первая тысяча циклов; *б* – два миллиона циклов

на рис. 7, путем задания требуемого управляющего напряжения. Напряжение составляло 70 и 100 В, что соответствовало удельной силе 27 и 56 мкН. Принято считать, что при контактом усилии в несколько десятков микроньютонов неровности контактирующих поверхностей испытывают упругую деформацию. В этом случае эффективный радиус пятна контакта определяется следующим выражением [25]:

$$r_{\text{eff}} = \sqrt[3]{\frac{3F_C r}{4E'}}, \quad (1)$$

где r – радиус кривизны неровности поверхности, E' – модуль Герца контактирующих материалов. Эффективный радиус позволяет найти сопротивление

$$R_C = \frac{4\rho K}{3\pi r_{\text{eff}}}, \quad (2)$$

где ρ – удельное сопротивление материала, K – число Кнудсена. Таким образом, R_C пропорционально $F_C^{-1/3}$, поэтому увеличение силы с 27 до 56 мкН должно снижать сопротивление в 1.3 раза.

Для обоих значений F_C были испытаны несколько образцов, каждый из которых совершил 25 000 циклов коммутации. Зависимость среднего значения сопротивления контактов Pt-Pt от числа циклов представлена на рис. 10. При $F_C = 27$ мкН наблюдалось монотонное возрастание сопротивления с 300 до 1250 Ом, обусловленное деградацией контактов. Увеличение силы до 56 мкН снизило начальное сопротивление до 200 Ом. Снижение произошло в 1.5 раза и превзошло ожидаемый эффект. Однако с увеличением силы рост сопротивления ускорился. Через 25 000 циклов R_C превышало 16 кОм. Ускорение роста было обусловлено более интенсивным накоплением фрикционных полимеров и механическим износом поверхностей.

В отличие от платиновых контактов, структуры Ru-Ru демонстрировали рост R_C лишь на протяжении первых 10 000–15 000 циклов (см. рис. 10). Далее наблюдались осцилляции сопротивления на уровне 400–500 Ом. При $F_C = 27$ мкН начальное значение составляло 385 Ом. Увеличение силы до 56 мкН снизило его до 215 Ом. Однако, как и в случае платины, с ростом усилия деградация контактов происходила более интенсивно, поэтому за 10 000 циклов значения R_C для обоих значений F_C практически выровнялись и составляли 480–500 Ом.

Использование рутения в качестве материала контактов существенно замедлило рост сопротивления в ходе работы переключателя. Тем не менее R_C было достаточно велико и составляло несколько сотен Ом. С целью уменьшения сопротивления материал коммутируемых электродов был заменен на золото. Контактные выступы по-прежнему формировались из рутения. Зависи-

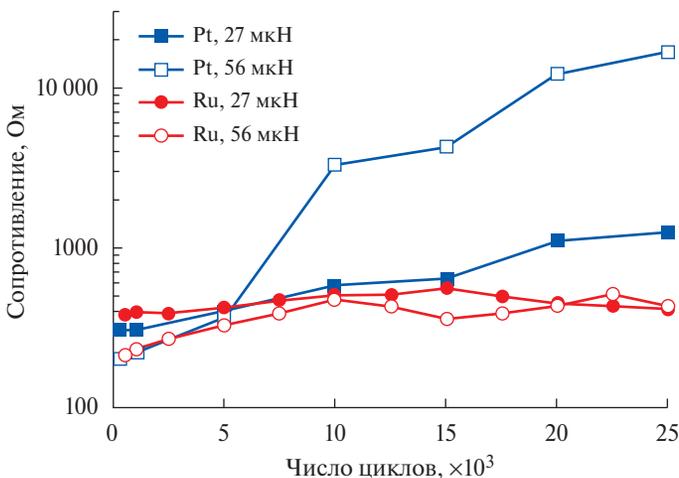


Рис. 10. Зависимость сопротивления двухконтактных ключей на основе платины и рутения от числа рабочих циклов

мость сопротивления контактов Au-Ru от числа циклов коммутации приведена на рис. 11. Двухконтактные ключи обладали сопротивлением от 330 до 600 Ом при $F_C = 27$ мкН и имели более высокое R_C по сравнению с изделиями на основе Ru-Ru. Одноконтактные переключатели демонстрировали гораздо меньшее сопротивление, в среднем составляющее 60–80 Ом. Рост R_C с числом циклов коммутации не наблюдался. Стоит отметить, что ключи работали при относительно низком управляющем напряжении $V_{G1} = V_{G2} = 40$ В, поскольку превышение этого значения приводило к чрезмерному скручиванию балки вокруг продольной оси и короткому замыканию. Указанному напряжению соответствовала сила прижима 15 мкН. Однако даже при таком небольшом усилии R_C было в несколько раз ниже по сравнению с двухконтактными ключами, работающими при вдвое большей F_C . Возможной причиной низкого сопротивления являлся более высокий ток, протекающий через одиночный контакт, поскольку рост тока мог приводить к частичному разрушению пленок контаминации.

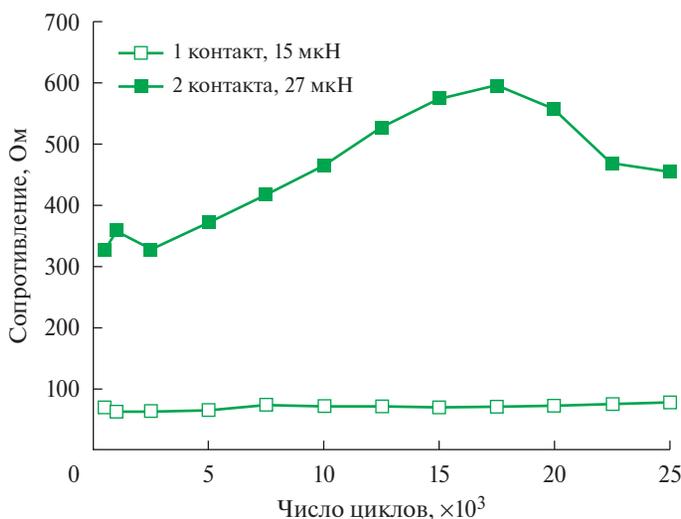


Рис. 11. Зависимость сопротивления ключей с контактами Au-Ru от числа рабочих циклов

Сопротивление одноконтактных переключателей варьировалось от образца к образцу. Рис. 12 иллюстрирует характерные зависимости R_C от числа циклов коммутации. Один из образцов обладал сопротивлением в диапазоне 90–100 Ом, причем такое значение наблюдалось с самого начала теста. В ходе испытаний R_C кратковременно снижалось до 70 Ом и возрастало до 150 Ом. Другой образец демонстрировал сопротивление 20–40 Ом, существенные скачки отсутствовали. Разница в рабочих характеристиках была обусловлена различием в исходном состоянии контактирующих поверхностей. СЭМ-изображение электродов из золота представлено на рис. 13, а. Области, не прикрытые балкой, имели развитый рельеф поверхности, в то время как под балкой шероховатость была заметно меньше.

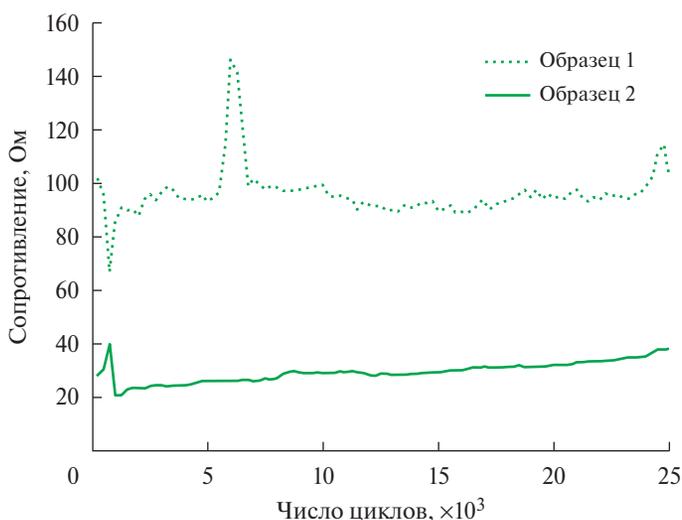
Химический состав коммутируемого электрода был исследован методом рентгеновского энергодисперсионного микроанализа с помощью спектро-

Таблица 1. Химический состав коммутируемого электрода (в ат. %)

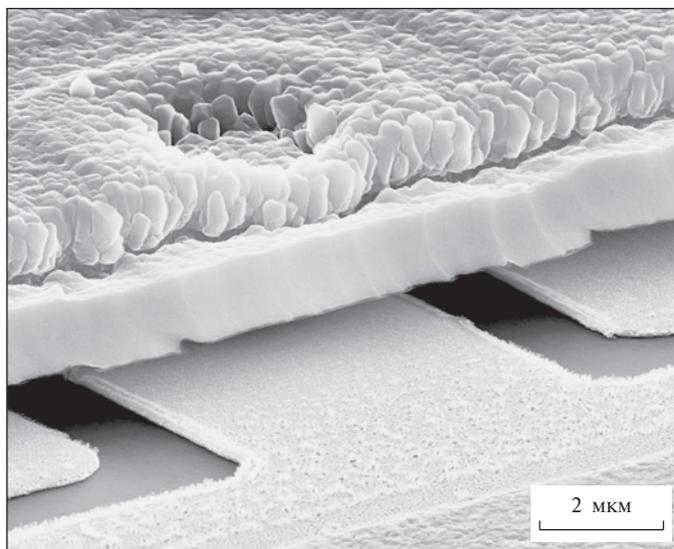
Химический элемент	Область 1	Область 2
C	11.2	45.5
O	6.1	7.6
Al	2.6	1.2
Si	2.7	2.8
Au	77.4	42.9

метра Oxford Instruments INCA X-act, установленного в СЭМ Zeiss Supra 40 (табл. 1). Ускоряющее напряжение составляло 4 кВ. Балка была удалена с помощью скотча, тем самым обеспечивался доступ к электродам под ней. Анализ был выполнен в двух областях, отмеченных на рис. 13, б. В обоих местах регистрировалось небольшое содержание кремния и кислорода, обусловленное проникновением бомбардирующих электронов в диэлектрический слой. Также в образце присутствовало некоторое количество алюминия, объясняющееся распылением материала балки в ходе травления жертвенного слоя в плазме SF₆. Область с развитым рельефом (зона 2) отличалась большим содержанием углерода, составляющим 45.5%, а также существенно меньшим содержанием золота по сравнению с гладкой областью (зона 1). Вероятно, плазменное травление сопровождалось осаждением углерода на открытую часть электрода. Осажденный слой блокировал излучение, идущее из пленки Au, чем объяснялось более низкое содержание этого металла в химическом составе.

Содержание углерода в области 1 составляло 11.2%. Следовательно, зона контакта также была подвержена контаминации. Степень загрязнения определялась особенностями технологии изготовления и, в частности, параметрами процесса травления жертвенного слоя. Эти параметры могли варьироваться

**Рис. 12.** Зависимость сопротивления одноконтактных ключей Au-Ru от числа рабочих циклов

a



б

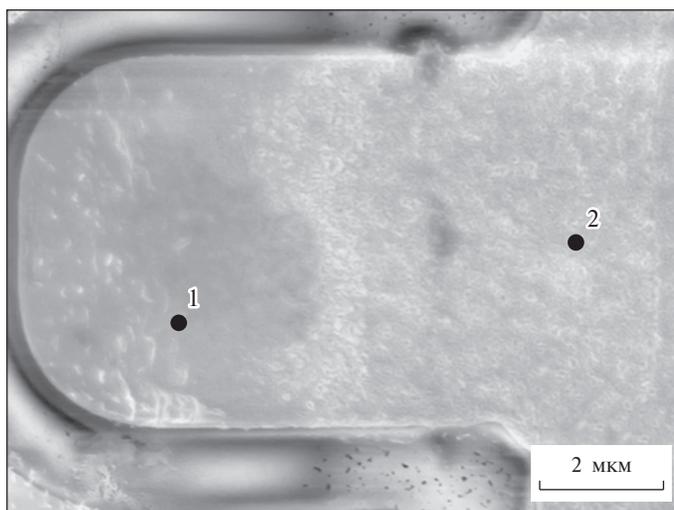


Рис. 13. СЭМ-изображения коммутируемого электрода из золота: *a* – вид под углом 20° к плоскости подложки; *б* – вид под углом 90° , балка удалена; точками обозначены области рентгеновского микроанализа

от образца к образцу, что и объясняло разницу в сопротивлении. Важно отметить, что среди используемых металлов золото было наиболее подвержено контаминации в ходе плазменного травления. Устранение этого явления за счет коррекции параметров травления позволит снизить контактное сопротивление переключателя. В качестве дополнительной меры снижения контаминации рассматривается очистка контактов в кислородной плазме [58].

Выводы

В работе представлены результаты исследования МЭМС-переключателя электростатического типа с резистивным контактом. Переключатель представляет собой алюминиевую балку длиной 100 мкм и шириной 45 мкм, закрепленную на торсионных подвесах. Управляющие электроды находятся под обоими плечами балки. Это позволяет создавать дополнительную размыкающую силу и тем самым защитить контакты от залипания. Переключатель обладает напряжением срабатывания 27 В, что в несколько раз ниже по сравнению с рабочим напряжением известных коммерчески доступных изделий. Сила прижима контактов достигает 112 мкН при управляющем напряжении 100 В. Ключ изготавливается на окисленных кремниевых пластинах методом поверхностной микрообработки. Маршрут включает в себя пять этапов фотолитографии и «сухое» удаление жертвенного слоя. Переключатель изготавливается в двух вариантах, отличающихся количеством контактных выступов. Технология позволяет формировать контакты из широкого набора материалов. В настоящей работе используется золото, платина и рутений.

Рабочие характеристики контактов исследуются в режиме холодного переключения на частоте срабатывания 4 Гц. Коммутируемый сигнал представляет собой постоянное напряжение величиной 5 В, ток ограничен величиной 1 мА. Контакт Pt-Pt имеет нестабильное сопротивление вследствие образования фрикционных полимеров. Сопротивление монотонно возрастает с ростом числа циклов коммутации. Увеличение силы прижима с 27 до 56 мкН усиливает деградацию контактов, что приводит к более быстрому увеличению R_C . За 25 000 циклов сопротивление возрастает с 200 Ом до 16 кОм. Контакт Ru-Ru обеспечивает более стабильное сопротивление. Рост R_C наблюдается лишь на протяжении первых 10 000–15 000 циклов, затем сопротивление стабилизируется на уровне 400–500 Ом. Также рутениевые контакты имеют более длительный срок службы по сравнению с платиной. Они выдерживают более $1.8 \cdot 10^6$ срабатываний, в то время как контакт Pt-Pt имеет ресурс менее $4 \cdot 10^4$ циклов. Двухконтактный переключатель на основе Au-Ru по сопротивлению сравним с изделием Ru-Ru. Одноконтактный ключ демонстрирует существенно меньшее R_C , в среднем составляющее 60–80 Ом. Сопротивление варьируется от образца к образцу, что обусловлено формированием углеродной пленки на поверхности золота в ходе плазменного травления жертвенного слоя. Минимальное зарегистрированное R_C составляет 20 Ом. Ожидается, что устранение контаминации путем корректировки процесса травления и плазменной очистки контактов обеспечит сопротивление ниже этого уровня.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ФТИАН им. К.А. Валиева РАН Минобрнауки РФ по теме № FFNN-2022-0017.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Rebeiz G.M., Patel C.D., Han S.K., Ko C.-H., Ho K.M.J.* The search for a reliable MEMS switch // *IEEE Microw. Mag.* 2013. Vol. 14. P. 57–67.
2. *Iannacci J.* RF-MEMS for high-performance and widely reconfigurable passive components: A review with focus on future telecommunications, Internet of Things (IoT) and 5G applications // *J. King Saud Univ.* 2017. Vol. 29. P. 436–443.

3. *Shekhar S., Vinoy K.J., Ananthasuresh G.K.* Low-voltage high-reliability MEMS switch for millimeter wave 5G applications // *J. Micromech. Microeng.* 2018. Vol. 28. 075012.
4. *Ma L.-Y., Soin N., Daut M.H.M., Hatta S.F.W.M.* Comprehensive study on RF-MEMS switches used for 5G scenario // *IEEE Access.* 2019. Vol. 7. 107506.
5. *Rao K.R., Kumar P.A., Guha K., Sailaja B.V.S., Vineetha K.V., Baishnab K.L., Sravani K.G.* Design and simulation of fixed-fixed flexure type RF MEMS switch for reconfigurable antenna // *Microsyst. Technol.* 2021. Vol. 27. P. 455–462.
6. *Xu Y., Tian Y., Zhang B., Duan J., Yan L.* A novel RF MEMS switch on frequency reconfigurable antenna application // *Microsyst. Technol.* 2018. Vol. 24. P. 3833–3841.
7. *Haupt R.L., Lanagan M.* Reconfigurable antennas // *IEEE Antennas Propag. Mag.* 2013. Vol. 55. P. 49–61.
8. *Haider N., Caratelli D., Yarovoy A.G.* Recent developments in reconfigurable and multiband antenna technology // *Int. J. Antennas Propag.* 2013. Vol. 20. 869170.
9. *Zhou W., Sheng W., Cui J., Han Y., Ma X., Zhang R.* SR-Crossbar topology for large-scale RF MEMS switch matrices // *IET Microw. Antennas Propag.* 2019. Vol. 13. P. 231–238.
10. *Daneshmand M., Mansour R.R.* RF MEMS satellite switch matrices // *IEEE Microw. Mag.* 2011. Vol. 12. P. 92–109.
11. *Cao T., Hu T., Zhao Y.* Research status and development trend of MEMS switches: A review // *Micromachines.* 2020. Vol. 11. P. 694.
12. *Kurmendra, Kumar R.* A review on RF microelectromechanical systems (MEMS) switch for radio frequency applications // *Microsyst. Technol.* 2021. Vol. 27. P. 2525–2542.
13. *Gaddi R., Van Kampen R., Unamuno A., Joshi V., Lacey D.* et al. MEMS technology integrated in the CMOS back end // *Microelectron. Reliab.* 2010. Vol. 50. P. 1593–1598.
14. *Dai C.-L., Chen J.-H.* Low voltage actuated RF micromechanical switches fabricated using CMOS-MEMS technique // *Microsyst. Technol.* 2006. Vol. 12. P. 1143–1151.
15. *Dey S., Koul S.K., Poddar A.K., Rohde U.L.* Ku to V-band 4-bit MEMS phase shifter bank using high isolation SP4T switches and DMTL structures // *J. Micromech. Microeng.* 2017. Vol. 27. 105010.
16. *Sharma A.K., Gautam A.K., Farinelli P., Dutta A., Singh S.G.* A Ku band 5-bit MEMS phase shifter for active electronically steerable phased array applications // *J. Micromech. Microeng.* 2015. Vol. 25. 035014.
17. *Gong S., Shen H., Barker N.S.* A 60 GHz 2-bit switched-line phase shifter using SP4T RF-MEMS switches // *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.* 2011. Vol. 59. P. 894–900.
18. *Park J.-H., Lee S., Kim J.-M., Kim H.-T., Kwon Y., Kim Y.-K.* Reconfigurable millimeter-wave filters using CPW-based periodic structures with novel multiple-contact MEMS switches // *J. Microelectromech. Syst.* 2005. Vol. 14. P. 456–463.
19. *Peroulis D., Pacheco S., Sarabandi K., Katehi L.P.B.* Tunable lumped components with applications to reconfigurable MEMS filters // 2001 IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig. 2001. DOI: 10.1109/MWSYM.2001.966902.
20. *Li M., Zhang Y., Zhao Y., Xue P., Wu Q.* Design and fabrication of a 4-bit RF MEMS attenuator with a high attenuation accuracy // *Analog Integr. Circ. Sig. Process.* 2020. Vol. 102. P. 617–624.
21. *Iannacci J., Tschoban C.* RF-MEMS for future mobile applications: Experimental verification of a reconfigurable 8-bit power attenuator up to 110 GHz // *J. Micromech. Microeng.* 2017. Vol. 27. 044003.
22. *Guo X., Gong Z., Zhong Q., Liang X., Liu Z.* A miniaturized reconfigurable broadband attenuator based on RF MEMS switches // *J. Micromech. Microeng.* 2016. Vol. 26. 074002.
23. *Heredia J., Ribó M., Pradell L., Wipf S.T., Göritz A.* et al. A 125–143 GHz frequency-reconfigurable BiCMOS compact LNA using a single RF-MEMS switch // *IEEE Microw. Compon. Lett.* 2019. Vol. 29. P. 339–341.

24. *van Spengen W.M., Roobol S.B., Klaassen W.P., Oosterkamp T.H.* The MEMSamp: Using (RF-)MEMS switches for the micromechanical amplification of electronic signals // *J. Micromech. Microeng.* 2010. Vol. 20. 125011.
25. *Toler B.F., Coutu R.A., McBride J.W.* A review of micro-contact physics for microelectromechanical systems (MEMS) metal contact switches // *J. Micromech. Microeng.* 2013. Vol. 23. 103001.
26. *Basu A., Adams G.G., McGruer N.E.* A review of micro-contact physics, materials, and failure mechanisms in direct-contact RF MEMS switches // *J. Micromech. Microeng.* 2016. Vol. 26. 104004.
27. *de Boer M.P., Czaplewski D.A., Baker M.S., Wolfley S.L., Ohlhausen J.A.* Design, fabrication, performance and reliability of Pt- and RuO₂-coated microrelays tested in ultra-high purity gas environments // *J. Micromech. Microeng.* 2012. Vol. 22. 105027.
28. *Oh C., de Boer M.* Effects of hot switching and contamination on contact reliability of Pt-coated microswitches // *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol.* 2020. Vol. 10. P. 247–254.
29. *Walker M., Nordquist C., Czaplewski D., Patrizi G., McGruer N., Krim J.* Impact of in situ oxygen plasma cleaning on the resistance of Ru and Au-Ru based of microelectromechanical system contacts in vacuum // *J. Appl. Phys.* 2010. Vol. 107. 084509.
30. *Oh C., Streller F., Ashurst W.R., Carpick R.W., de Boer M.P.* In situ oxygen plasma cleaning of microswitch surfaces – comparison of Ti and graphite electrodes // *J. Micromech. Microeng.* 2016. Vol. 26. 115020.
31. *Mehta K., Bansal D., Bajpai A., Kumar P., Kumar A., Rangra K.* Improved isolation RF MEMS switch with post release ashing // *Microsyst. Technol.* 2018. Vol. 24. P. 3863–3866.
32. *Uvarov I.V., Marukhin N.V., Naumov V.V.* Contact resistance and lifecycle of a single- and multiple-contact MEMS switch // *Microsyst. Technol.* 2019. Vol. 25. P. 4135–4141.
33. *Anuroop Bansal D., Khushbu Kumar P., Kumar A.R., Rangra K.J.* Contact area design of ohmic RF MEMS switch for enhanced power handling // *12th Int. Conf. Sens. Technol.* 2018. DOI: 10.1109/ICSensT.2018.8603623.
34. *Pal J., Zhu Y., Dao D., Lu J., Khan F.* Study on contact resistance in single-contact and multi-contact MEMS switches // *Microelectron. Eng.* 2015. Vol. 135. P. 13–16.
35. *El-Sinawi A.H., Bakri-Kassem M., Landolsi T., Awad O.* A novel comprehensive approach to feedback control of membrane displacement in radio frequency micro-electromechanical switches // *Sens. Actuators A.* 2015. Vol. 221. P. 123–130.
36. *Persano A., Tazzoli A., Cola A., Siciliano P., Meneghesso G., Quaranta F.* Reliability enhancement by suitable actuation waveforms for capacitive RF MEMS switches in III–V technology // *J. Microelectromech. Syst.* 2012. Vol. 21. P. 414–419.
37. *Czaplewski D.A., Dyck C.W., Sumali H., Massad J.E., Kuppens J.D.* et al. A soft-landing waveform for actuation of a single-pole single-throw ohmic RF MEMS switch // *J. Microelectromech. Syst.* 2006. Vol. 15. P. 1586–1594.
38. *Song Y.-H., Kim M.-W., Lee J.O., Ko S.D., Yoon J.-B.* Complementary dual-contact switch using soft and hard contact materials for achieving low contact resistance and high reliability simultaneously // *J. Microelectromech. Syst.* 2013. Vol. 22. P. 846–854.
39. *Song Y.-H., Kim M.-W., Seo M.-H., Yoon J.-B.* A complementary dual-contact MEMS switch using a «zipping» technique // *J. Microelectromech. Syst.* 2014. Vol. 23. P. 710–718.
40. *Liu Y., Bey Y., Liu X.* Extension of the hot-switching reliability of RF-MEMS switches using a series contact protection technique // *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.* 2016. Vol. 64. P. 3151–3162.
41. *Song Y.-H., Ko S.-D., Yoon J.-B.* A highly reliable two-axis MEMS relay demonstrating a novel contact refresh method // *J. Microelectromech. Syst.* 2015. Vol. 24. P. 1495–1502.
42. *Ma Q., Tran Q., Chou T.-K.A., Heck J., Bar H., Kant R., Rao V.* RF Metal contact reliability of RF MEMS switches // *Proc. SPIE.* 2007. Vol. 6463. 646305.

43. *Broue A., Fourcade T., Dhennin J., Courtade F., Charvet P.-L.* et al. Validation of bending tests by nanoindentation for micro-contact analysis of MEMS switches // *J. Micromech. Microeng.* 2010. Vol. 20. 085025.
44. *Broue A., Dhennin J., Charvet P.-L., Pons P., Ben Jemaa N.* et al. Comparative study of RF MEMS micro-contact materials // *Int. J. Microw. Wireless Technol.* 2012. Vol. 4. P. 413–420.
45. *Yamashita T., Itoh T., Suga T.* Investigation of anti-stiction coating for ohmic contact MEMS switches with thiophenol and 2-naphthalenethiol self-assembled monolayer // *Sens. Actuators A.* 2011. Vol. 172. P. 455–461.
46. *Chen L., Guo Z.J., Joshi N., Eid H., Adams G.G., McGruer N.E.* An improved SPM-based contact tester for the study of microcontacts // *J. Micromech. Microeng.* 2012. Vol. 22. 045017.
47. *Schimkat J.* Contact measurements providing basic design data for microrelay actuators // *Sens. Actuators.* 1999. Vol. 73. P. 138–143.
48. *Kwon H., Park J.-H., Lee H.-C., Choi D.-J., Park Y.-H., Nam H.-J., Joo Y.-C.* Investigation of similar and dissimilar metal contacts for reliable radio frequency microelectromechanical switches // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2008. Vol. 47. P. 6558–6562.
49. *Coutu R.A., Tomer D.* Micro-contacts testing using a micro-force sensor compatible with biological systems // *Int. J. Biosens. Bioelectron.* 2017. Vol. 3. 00052.
50. *Bull T.G., McBride J.W.* In situ contact surface characterization in a MEMS ohmic switch under low current switching // *Technologies.* 2018. Vol. 6. P. 47.
51. *Mahanta P., Anwar F., Coutu R.A.* Novel test fixture for characterizing MEMS switch microcontact reliability and performance // *Sensors.* 2019. Vol. 19. P. 579.
52. *Uvarov I.V., Kupriyanov A.N.* Investigation of characteristics of electrostatically actuated MEMS switch with an active contact breaking mechanism // *Russ. Microelectron.* 2018. Vol. 47. P. 307–316.
53. *Marukhin N.V., Uvarov I.V.* An improved design of a seesaw-type MEMS switch for increased contact force // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020. Vol. 1695. 012157.
54. *Uvarov I.V., Kupriyanov A.N.* Stiction-protected MEMS switch with low actuation voltage // *Microsyst. Technol.* 2019. Vol. 25. P. 3243–3251.
55. *Czaplewski D.A., Nordquist C.D., Dyck C.W., Patrizi G.A., Kraus G.M., Cowan W.D.* Lifetime limitations of ohmic, contacting RF MEMS switches with Au, Pt and Ir contact materials due to accumulation of «friction polymer» on the contacts // *J. Micromech. Microeng.* 2012. Vol. 22. 105005.
56. *Cumpson P.J., Seah M.P.* Stability of reference masses. IV: Growth of carbonaceous contamination on platinum-iridium alloy surfaces, and cleaning by UV/ozone treatment // *Metrologia.* 1996. Vol. 33. P. 507–532.
57. *Czaplewski D.A., Nordquist C.D., Patrizi G.A., Kraus G.M., Cowan W.D.* RF MEMS switches with RuO₂-Au contacts cycled to 10 billion cycles // *J. Microelectromech. Syst.* 2013. Vol. 22. P. 655–661.
58. *Walker M., Nordquist C., Czaplewski D., Patrizi G., McGruer N., Krim J.* Impact of in situ oxygen plasma cleaning on the resistance of Ru and Au-Ru based of microelectromechanical system contacts in vacuum // *J. Appl. Phys.* 2010. Vol. 107. 084509.