

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯ X-ДИАПАЗОНА КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

© 2019 г. Е. А. Савин¹, *, Г. К. Алагашев¹, П. И. Дидык², А. А. Жуков², К. А. Чадин¹

¹ООО “Базовые технологии”,

Российская Федерация, 121108 Москва, ул. Ивана Франко, 4, стр. 10

²АО “Российские космические системы”,

Российская Федерация, 111250 Москва, ул. Авиамоторная, 53

*E-mail: e.savin@btlabs.ru

Поступила в редакцию 01.09.2017 г.

После доработки 29.09.2017 г.

Принята к публикации 31.10.2017 г.

Представлены результаты моделирования СВЧ и механических характеристик переключателя X-диапазона, основанного на технологии высокочастотных микроэлектромеханических структур (ВЧ МЭМС). Представлена методика проектирования как прибора, предназначенного для работы непосредственно во внешней среде, так и прибора, где подвижные элементы находятся в диэлектрическом корпусе. Приведены характеристики оптимизированных переключателей. Также проведены оценочные механические расчеты, подтверждающие высокую стабильность разработанных ВЧ МЭМС переключателей в диапазоне температур, характерном для приборов, применяемых в космической промышленности.

DOI: 10.1134/S0033849419010108

ВВЕДЕНИЕ

В области СВЧ-электроники, связанной с разработкой конденсаторов переменной емкости, или переключателей, активно ведутся работы по освоению технологии высокочастотных микроэлектромеханических структур (ВЧ МЭМС) [1, 2], которая является наиболее перспективной по сравнению с конкурирующей полупроводниковой элементной базой. Принцип работы элементов на базе технологии ВЧ МЭМС основан на механической деформации подвижного элемента конструкции (мембраны или кантилевера) под действием электростатических сил, вызываемых приложением постоянного напряжения к управляющему электроду. Механическая деформация приводит к изменению расстояния между электродами, что позволяет реализовывать многоступенчатые устройства с перестраиваемой емкостью: многоканальные коммутаторы, индуктивности и емкости переменных номиналов, перестраиваемые резонаторы и фильтры частот и т.д.

Важную роль играют и работы по оценке радиационной стойкости, что особенно актуально для бортовой аппаратуры ракетно-космической техники. Достигнутые значения позволяют использовать технологию ВЧ МЭМС в узлах устройств, для которых характерны требования широкого температурного диапазона, низких управляющих напряжений, значительного числа циклов сраба-

тываний и высокой радиационной стойкости. Указанные обстоятельства обуславливают актуальность работы по комплексному моделированию ВЧ МЭМС переключателя для особо жестких условий эксплуатации приборов космического назначения.

В статье описывается процесс разработки ВЧ МЭМС переключателя. Цель работы – создать переключатель X-диапазона на основе ВЧ МЭМС для использования в перспективных космических системах. Преимущества такого переключателя – это крайне малая масса и размеры, низкое энергопотребление, возможность интеграции с существующими микроэлектронными технологиями, радиационная стойкость.

1. СХЕМА И ПРИНЦИП РАБОТЫ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯ

Схема ВЧ МЭМС переключателя представлена на рис. 1 и состоит из нижнего управляющего электрода (1), который является передающей линией, тонкого слоя изолирующего диэлектрика (3), сформированного на нижнем электроде, и подвижного металлического электрода (кантилевера), расположенного на некотором расстоянии от диэлектрика и формирующего емкость. При приложении напряжения активации на управляю-

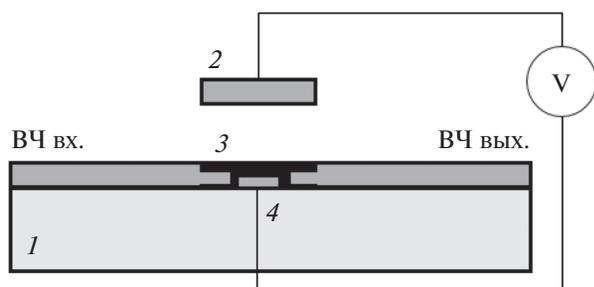


Рис. 1. Принципиальная схема разрабатываемого ВЧ МЭМС переключателя: 1 – диэлектрическая подложка, 2 – подвешенный электрод, 3 – изолирующий диэлектрик, 4 – управляющий электрод.

ший электрод подвесной заземленный электрод (рис. 1) шунтирует проводящую линию [3].

В качестве подложки обычно используют либо высокоомный кремний, либо сапфир, металлизация состоит из слоев хром–медь–золото, толщина металлизации от 1 до 2 мкм в зависимости от технологии изготовления [4]. Нижняя граница толщины обусловлена увеличением потерь в структуре. В качестве изолирующего диэлектрика использован нитрид кремния.

2. ВЫБОР ТОПОЛОГИИ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯ

Топология переключателя (рис. 2) основана на копланарном волноводе [5], преимущества которого заключаются в том, что на одной плоскости располагается как центральная сигнальная линия, так и две заземленные линии. Толщина подложки

из высокоомного кремния с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 11.9$ составляет 430 мкм, что позволяет электрическому полю затухать в области нижней плоскости прибора. Таким образом, материал, на который монтируется переключатель, будь то металл или диэлектрик, не влияет на параметры прохождения сигнала. Габаритные размеры переключателя составляют 2×2 мм, что обусловлено требованиями, предъявляемыми к пространству для интеграции конструкции.

Ширина центрального проводника и зазор между ним и заземленными электродами оптимизированы, чтобы получить волновое сопротивление линии, равное 50 Ом, и обеспечить согласование с входным и выходным портом. Поднятый кантилевер электрически соединен с заземленным электродом с одной стороны устройства, а постоянное напряжение подается на контакт, расположенный под слоем нитрида кремния.

В рассмотренной модели контакты разомкнутой передающей линии формируют емкость, а металлизация контакта кантилевера с заземленным электродом представляет собой индуктивность. Отметим, что медный электрод, на который подается управляющее напряжение, обладает малым электрическим сопротивлением, что влечет за собой сильную связь между источником постоянного напряжения и СВЧ-сигналом, поэтому необходима оптимизация геометрии этого электрода.

Таким образом, эквивалентная схема переключателя (см. рис. 2) представляет собой полосно-пропускающий фильтр третьего порядка (рис. 3а), где C_1 и C_2 – емкости контакта между краями кантилевера и краями разомкнутой передающей линии, L_1 и L_2 – собственные индуктивности канти-

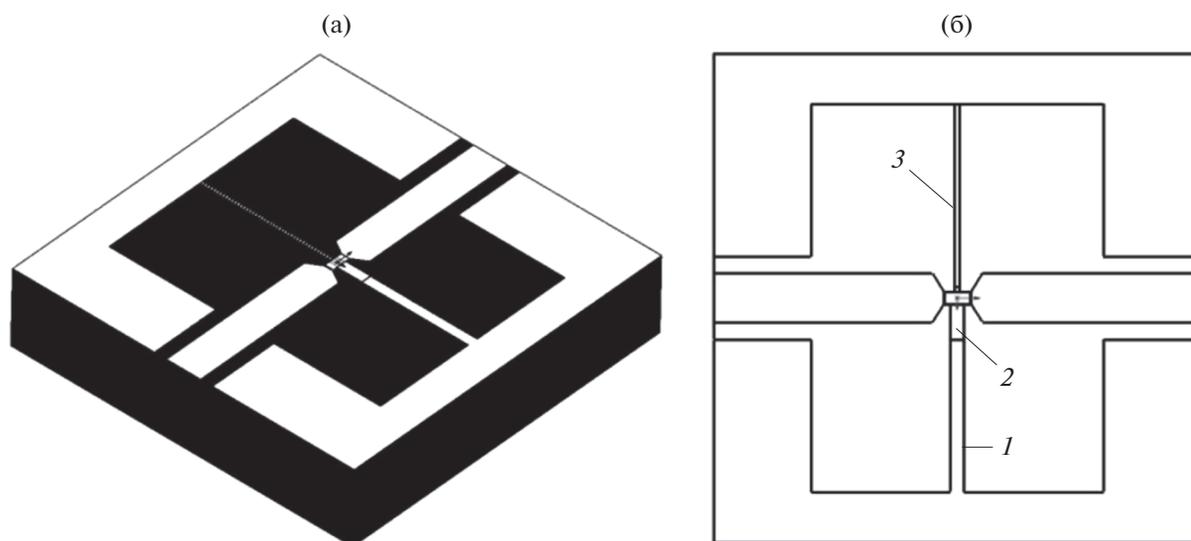


Рис. 2. Исходная топология переключателя, а – трехмерный вид, б – топология: 1 – металлизация связи кантилевера с заземленной линией, 2 – подвижной кантилевер, 3 – электрод с управляющим напряжением.

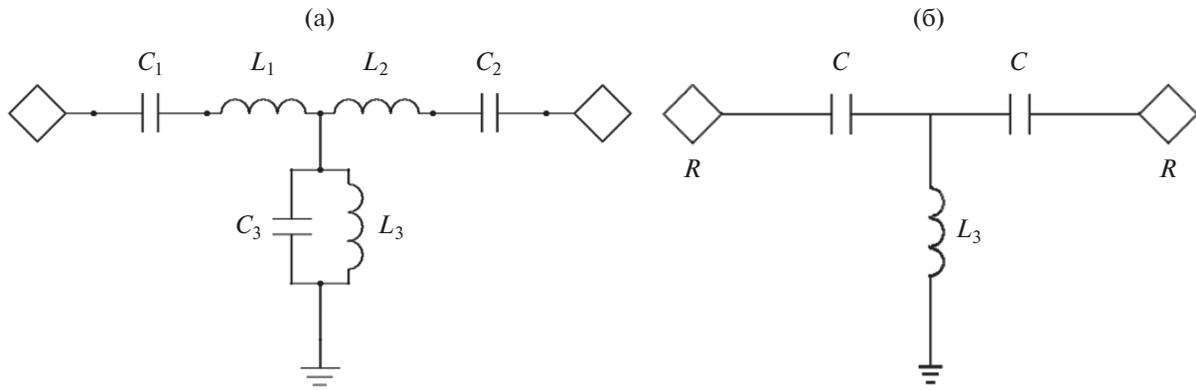


Рис. 3. Полная (а) и упрощенная (б) эквивалентные схемы переключателя как полосно-пропускающего фильтра.

левера, а C_3 и L_3 — емкость и индуктивность линии соединения кантилевера с заземленным электродом соответственно. Реактивные параметры проводников, а именно их емкость и индуктивность, проявляются на высоких частотах [6] и зависят от их размеров и геометрии. Для первого приближения можно принять, что $C_1 = C_2 = C$, так как кантилевер расположен симметрично по отношению к разрыву линии, а на частотах более 8 ГГц можно пренебречь незначительной индуктивностью кантилевера L_2 . Форма проводника, соединяющего кантилевер с заземленным электродом, представляет собой прямой или имеющий форму меандра участок проводника, проявляющий в основном индуктивные свойства, при этом емкость C_3 имеет паразитный характер и незначительна и проявляет себя на частотах много больше 10 ГГц. Таким образом, в первом приближении в качестве эквивалентной схемы переключателя выступает фильтр верхних частот третьего порядка, состоящий из двух последовательных емкостей и параллельной индуктивности (рис. 3б).

3. ОПТИМИЗАЦИЯ ТОПОЛОГИИ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯ

Переключатель имеет два состояния: открытое, когда сигнал проходит сквозь него, и закрытое, когда передающая линия разорвана. Критериями оптимизации в частотном диапазоне 8...10 ГГц являются следующие параметры: уменьшение потерь проходящего сигнала в открытом переключателе менее 0.5 дБ (коэффициент ослабления) и увеличение изоляции, а именно уменьшение амплитуды проходящего сигнала в закрытом состоянии менее -25 дБ. Оптимизируемыми параметрами являются емкость C и индуктивность L_3 (см. рис. 3б).

При расчете эквивалентной схемы для параметров $L_3 = 0.89$ нГн и $C = 0.45$ пФ, зависимость коэффициента отражения S_{11} и коэффициента прохождения S_{21} для фильтра представлена на

рис. 4 в расширенном диапазоне частот. Из рисунка видно, что при подборе емкости и индуктивности фильтра, можно получить требуемые низкие потери начиная с частоты 7.5 МГц.

Реализация подобной индуктивности происходит при выборе геометрии электрода, связывающего кантилевер с заземленным электродом в виде меандра. Увеличение его длины увеличивает индуктивность. При этом развязка ВЧ-тракта и тракта постоянного напряжения осуществляется при добавлении реактивного индуктивного сопротивления в тракт цепи постоянного напряжения путем проектирования линии в виде меандра. Эта индуктивность располагается параллельно индуктивности при кантилевере. Таким образом, тракт постоянного напряжения представляет собой последовательный колебательный контур, образуемый емкостью между кантилевером и контактной площадкой управляющего напряжения, а также собственной индуктивности электрода. При этом, учитывая, что

$$L = \frac{L_4 L_3}{L_4 + L_3}, \tag{1}$$

где L_3 — это индуктивность при кантилевере, а L_4 — включенная параллельно ей индуктивность

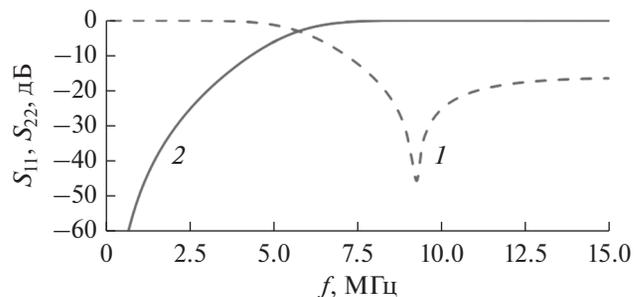


Рис. 4. Расчетные коэффициенты отражения (1) и прохождения (2) для оптимизированного фильтра в диапазоне частот.

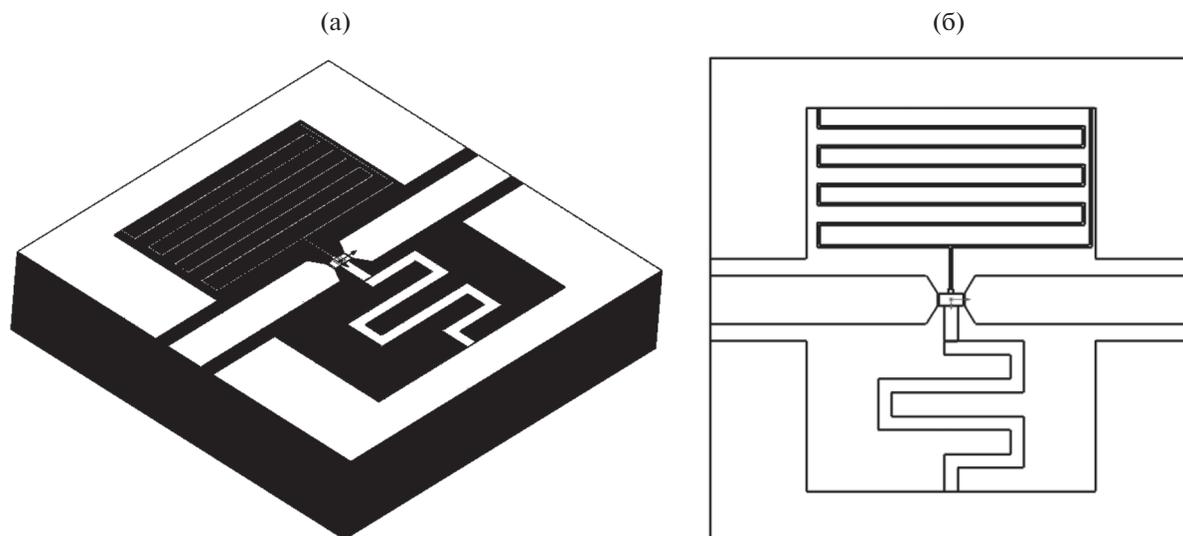


Рис. 5. Оптимизированная конструкция ВЧ МЭМС переключателя: трехмерный вид переключателя (а) и топология переключателя (б).

тракта управляющего напряжения, соотношение $L \approx L_3$ достигается, когда индуктивность L_4 много больше, чем L_3 . Поэтому меандр тракта управляющего напряжения имеет большую длину, чем меандр электрода при кантилевере (рис. 5).

На рис. 6 представлена геометрия поднятого кантилевера при скрытом слое изолирующего диэлектрика. Видны разрыв линии и управляющий электрод. Приведенные на рис. 7 зависимости коэффициентов отражения и прохождения сигнала для закрытого и открытого переключателей показывают, что в результате оптимизации получен частотный диапазон от 7.5 до 10 ГГц, где отражения от переключателя в открытом состоянии не превышают -20 дБ. Такой широкий диапазон позволит учесть разброс параметров при изготовлении.

Отсутствие резкого пика на графике коэффициента отражения (см. рис. 7) объясняется влиянием не учтенных в эквивалентной схеме паразитных емкостей и индуктивностей. Также следует отметить, что отсутствуют потери СВЧ-сигнала в

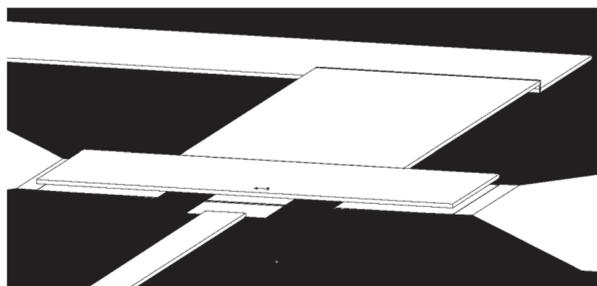


Рис. 6. Вид разрыва линии и поднятого кантилевера.

тракт управляющего напряжения, что указывает на успешную развязку этих линий.

4. МОДЕЛЬ КОРПУСИРОВАННОГО ВЧ МЭМС ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯ

Оптимизированная модель переключателя подразумевает, что его подвижной элемент находится в воздушной среде. При работе устройства без корпуса, микропыль, присутствующая в воздухе, может повредить механические составляющие переключателя, который является очень хрупким механизмом [7], а сконденсированная влага может спровоцировать прилипание кантилевера к слою нитрида кремния. Поэтому отдельно работающие приборы на основе ВЧМЭМС должны быть установлены в герметичный корпус. Предложен двусторонний вариант переключателя, где нижняя металлизация подложки открыта и представляет собой контактные площадки и отрезки копланарной линии, а верхняя металлизация закрыта крышкой и контактирует с нижней через металлизированные отверстия в подложке (рис. 8). При этом линия подачи управляющего напряжения изготавливается из высокорезистивного материала с проводимостью 0.025 См/м, что позволяет не проектировать и изготавливать ее в форме меандра.

Для предложенного макета переключателя (рис. 9) оптимизация производится при помощи параллельно включенной в тракт индуктивности и положения контактных отверстий друг относительно друга.

Результаты оптимизации такого макета представлены на рис. 10. Как видим, при включенном состоянии зависимость коэффициента передачи от частоты имеет крутой пик и больше похожа на

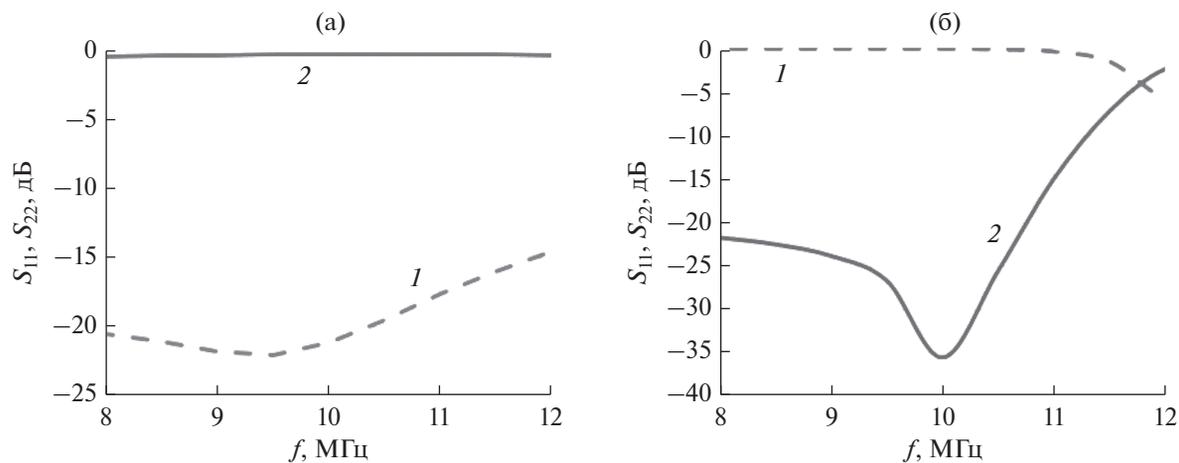


Рис. 7. Коэффициенты отражения (1) и прохождения (2) для переключателя в открытом (а) и закрытом (б) состояниях.

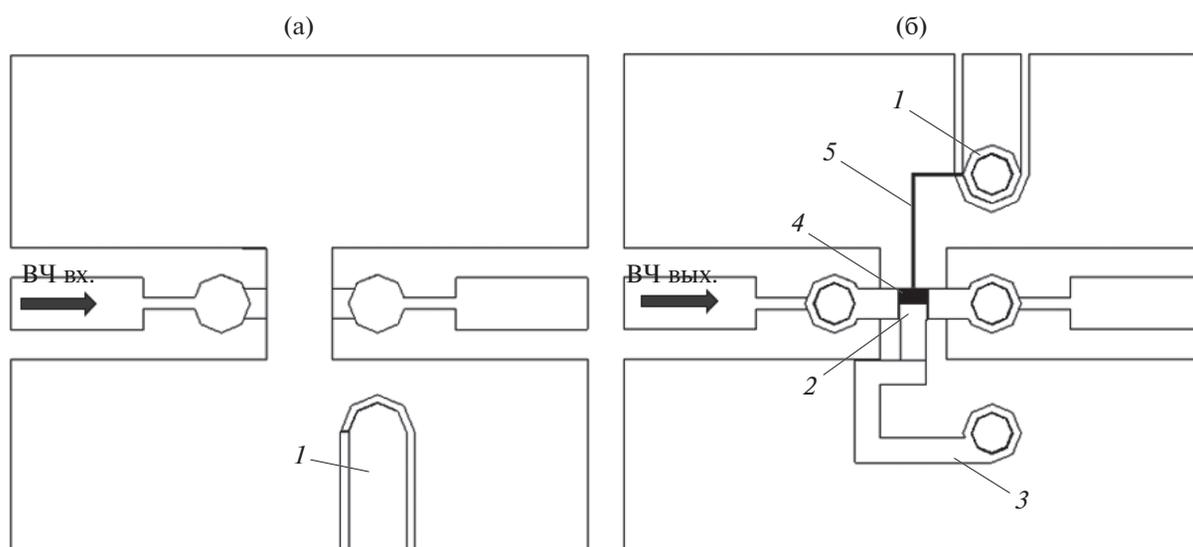


Рис. 8. Топология нижней (а) и верхней (б) металлизации двухстороннего переключателя с крышкой: 1 – контакт тракта управляющего напряжения; 2 – кантилевер; 3 – согласующее отверстие и индуктивность; 4 – изолирующий диэлектрик; 5 – высокорезистивный тракт постоянного напряжения.

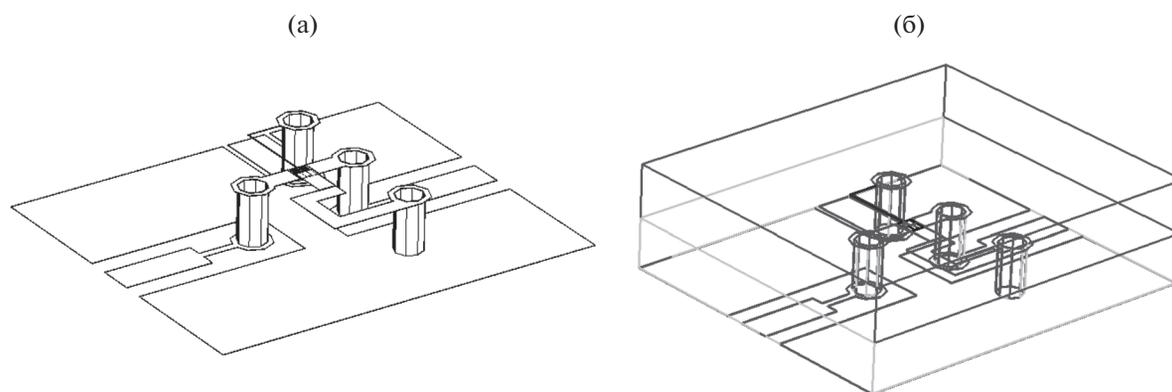


Рис. 9. Топология металлизаций переключателя (а) и всей модели с подложкой и стеклянной крышкой (б).

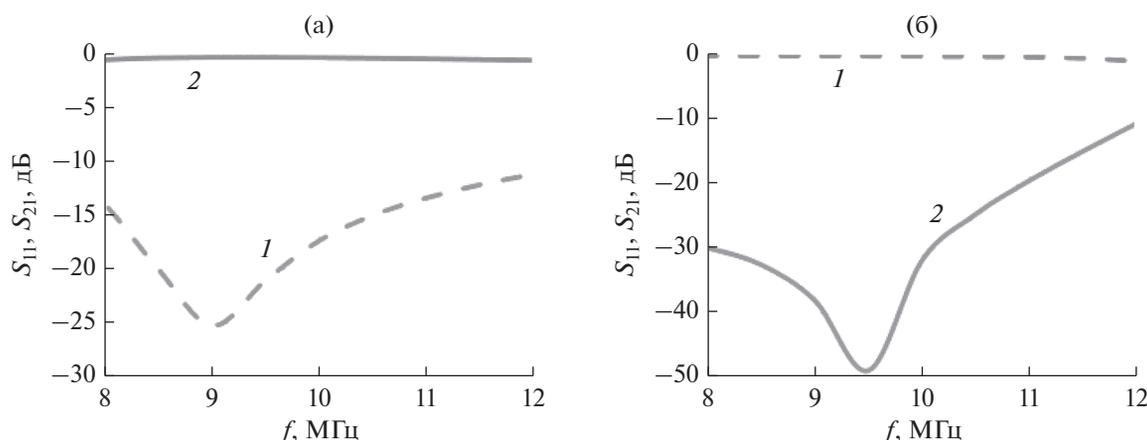


Рис. 10. Расчетные коэффициенты отражения (1) и потери (2) ВЧ МЭМС переключателя в полосе частот для двустороннего переключателя с крышкой в открытом (а) и закрытом (б) состояниях.

идеальную модель фильтра, рассчитанную при помощи эквивалентной схемы, параметры которой представлены на рис. 4. Это означает меньшее влияние паразитных емкостей и индуктивностей, что может быть связано с использованием в качестве тракта управляющего напряжения высококорезистивного элемента вместо медного меандра с высоким индуктивным сопротивлением. Рабочий диапазон разработанного переключателя уже, чем для открытой конструкции, и составляет 8.5...9.5 ГГц.

При механическом моделировании переключателя напряжение активации для разработанной геометрии составило 15 В. Форма деформированного переключателя представлена на рис. 11.

5. ВЛИЯНИЕ ПЕРЕПАДА ТЕМПЕРАТУР И КОСМИЧЕСКОЙ РАДИАЦИИ НА ПАРАМЕТРЫ

Как известно, космические аппараты подвергаются перепадам температур от -120 до 120°C . Так как спроектированный ВЧ МЭМС предназначен для космических применений, необходимо рассмотреть, как влияет перепад температур на его параметры. Особенно важно исследовать

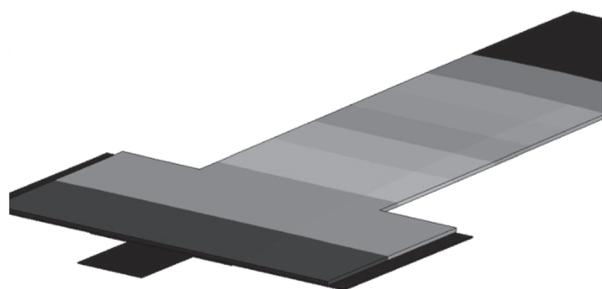


Рис. 11. Деформация кантилевера при приложении напряжения активации.

изменение геометрии кантилевера для критических температур.

Рассмотрена упрощенная модель кантилевера с фиксированным концом (рис. 12). Подвижной элемент состоит из двух слоев металлизации — медного (Cu) и золотого (Ag), толщина каждого слоя составляет 0.3 мкм. В расчетах учтена разница коэффициентов теплового расширения (КТР) для этих металлов: $\text{КТР}_{\text{Cu}} = 1.8 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, $\text{КТР}_{\text{Ag}} = 1.4 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Результаты моделирования (рис. 13) показывают, что для обоих случаев нагрева или охлаждения кантилевера максимальная деформация равна 0.5 мкм, что приводит к изменению емкости менее 0.5%. При этом различие между КТР меди и золота не приводит к изменению вертикального положения кантилевера.

По оценочным результатам механического моделирования можно сделать вывод, что разработанный ВЧ МЭМС переключатель будет показывать стабильные параметры при использовании его в условиях широкого перепада температур.

Вторым важным фактором, ограничивающим работу переключателей на основе полупроводниковой технологии, является стойкость к космическому излучению [8], достигающим значения до



Рис. 12. Материалы, из которых изготовлен рассматриваемый кантилевер.

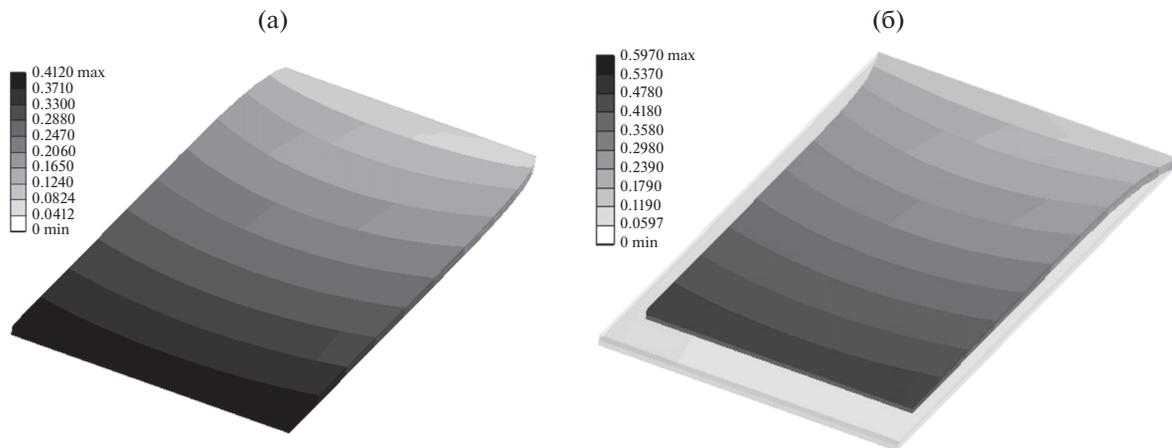


Рис. 13. Расширение кантилевера при нагреве до 120°C (а) и его сужение при охлаждении до –120°C (б). Деформация показана при увеличении в 93 раза.

10 кРад (несколько лет на орбите). Наиболее чувствительным к внешнему излучению элементом ВЧ МЭМС устройства является изолирующий диэлектрик, которым в нашем случае является нитрид кремния. Следует отметить, что металлические составляющие и сама кремниевая подложка не разрушаются. Воздействие космического излучения на диэлектрик, разделяющий управляющий и подвижной электроды, приводит к его ионизации и, таким образом, явлению прилипания кантилевера к слою нитрида кремния. Однако исходя из существующих экспериментальных исследований [9] можно сделать вывод, что ВЧ МЭМС устройства с электростатической активацией, даже без специальной оптимизации состава изолирующего диэлектрика, начинают деградировать лишь при суммарной дозе от 10 до 100 кРад, что является показателем надежности использования разработанной модели переключателя в космической промышленности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложены конструкции корпусированного и некорпусированного ВЧ-МЭМС переключателей частотного X-диапазона с напряжением управления не выше 15 В и поперечными размерами подложки из высокоомного кремния 3 × 3 мм. Бескорпусное исполнение предусматривает одностороннюю металлизацию и предназначено для использования в составе герметичных блоков аппаратуры. Корпусированный стеклянной крышкой переключатель имеет два слоя металлизации, выполненные с двух сторон подложки. Методами математического моделирования оптимизирована топология ВЧ МЭМС переключателя и показано, что потери не превышают значения 0.5 дБ, а согласование менее –20 дБ. При этом для обоих переключателей изоляция не превышает –20 дБ. Топология спроектированных и оптимизированных моделей

соответствует разработанной эквивалентной схеме полосно-пропускающего фильтра, а результаты трехмерного моделирования с поправкой на паразитные реактивные элементы соответствуют предсказанным с помощью эквивалентной схемы параметрам. Проведены оценочные механические расчеты, которые показали стабильность работоспособности переключателя в широком диапазоне температур, от –120 до 120°C. Полученные результаты являются основанием для разработки ВЧ МЭМС переключателя космического назначения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Федеральная целевая программа “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы”). Соглашение № 14.579.21.0137. Уникальный идентификатор RFMEFI57916X0137).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Nair A.G., Shajahan E.S.* // *Procedia Computer Sci.* 2016. V. 93. P. 217.
2. *Ai-Qun Liu.* RF MEMS Switches and Integrated Switching Circuits. Design, Fabrication and Test. New York: Springer, 2010.
3. *Rebeiz G.M.* RF MEMS Theory, Design and Technology. New Jersey: Wiley-Interscience, 2003.
4. *Savin E.A., Chadin K.A., Kirtaev R.V.* // *Microsystem Technologies.* 2018. V. 24. № 6. P. 2783–2788.
5. *Собенин Н.П., Милованов О.С.* Техника сверхвысоких частот. М.: Энергоатомиздат, 2007.
6. *Pozar D.M.* Microwave Engineering. New York: Wiley, 2012.
7. *Iannacci J.* Practical Guide to RF-MEMS. New York: Wiley, 2013.
8. *Iniewski K.* Radiation Effects in Semicunductors. Florida: CRC Press, 2010.
9. *Shea R.H.* // *Proc. SPIE.* 2011. V. 7928. P. 79280E.