

Комбинированный резистивно-емкостной МЭМС-переключатель для передовых систем связи

М.О. Морозов^{1,2*} И.В. Уваров^{2†}

¹Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова
Россия, 150003, Ярославль, Советская ул., д. 14

²Ярославский филиал Физико-технологического института им. К. А. Валиева Российской академии наук
Россия, 150067, Ярославль, Университетская ул., д. 21

(Поступила в редакцию 03.06.2024; подписана в печать 09.07.2024)

Основной характеристикой МЭМС-переключателя является отношение емкостей в замкнутом и разомкнутом состоянии. В стандартных изделиях это отношение обычно не превышает 10 и может быть увеличено в несколько раз за счет использования электрода с плавающим потенциалом. В работе исследуется зависимость емкостных характеристик, изоляции и вносимых потерь ключа с «плавающим» электродом в зависимости от материала подложки.

PACS: 85.85.+j

УДК: 621.3

Ключевые слова: МЭМС-переключатель, отношение емкостей, изоляция, вносимые потери, плавающий потенциал, метод конечных элементов.

ВВЕДЕНИЕ

МЭМС-переключатель представляет собой электро-механическое реле микронных размеров, изготовленное с использованием технологий микроэлектроники. Он обеспечивает малые вносимые потери и высокую изоляцию в сочетании с малыми габаритами, низким энергопотреблением и высоким быстродействием, что делает его перспективным для использования в системах связи пятого и шестого поколений.

Основной характеристикой переключателя с емкостным контактом является отношение емкостей в разомкнутом и замкнутом состояниях C_{down}/C_{up} . В изделиях стандартной конфигурации это отношение обычно не превышает 10 [1–4] и не обеспечивает требуемый эффект переключения. Для его увеличения предложены различные методы, такие как использование диэлектриков с высокой диэлектрической проницаемостью, уменьшение толщины диэлектрика, увеличение воздушного зазора и др. [5–7]. Однако эти подходы имеют множество недостатков. В частности, применение нестандартных диэлектриков требует существенной корректировки технологии изготовления ключа, а увеличение воздушного зазора ведет к росту напряжения срабатывания.

Одним из наиболее эффективных методов увеличения C_{down}/C_{up} является использование электрода с плавающим потенциалом [8, 9]. Этот способ лишен указанных выше недостатков и позволяет варьировать емкость переключателя в широких пределах без изменения конструкции подвижной части. На диэлектрическом покрытии линии передач размещается металлический электрод требуемой площади. Между балкой и электродом образуется кон-

такт металл-металл, поэтому переключатель становится резистивно-емкостным. Настоящая работа посвящена исследованию рабочих характеристик такого ключа, предназначенного для использования в передовых системах связи.

1. КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИП РАБОТЫ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯ

Предлагаемый МЭМС-переключатель схематично изображен на рис. 1, а. Подвижным электродом является алюминиевая балка длиной 100 мкм, закрепленная на торсионных подвесах. Под балкой на расстоянии 1 мкм проходит линия передач, на которой поверх диэлектрического слоя SiO₂ сформирован тонкий рутениевый электрод латеральным размером 35 × 46 мкм. В замкнутом состоянии (up-state) (рис. 1, б) его потенциал является плавающим. Емкость конденсатора, образованного балкой и линией передач, мала, поэтому сигнал проходит по линии с минимальными потерями. В разомкнутом состоянии (down-state) (рис. 1, в) балка приходит в контакт с электродом, и их потенциалы выравниваются. Емкость между балкой и линией существенно возрастает, и переключатель шунтирует линию передач, блокируя прохождение сигнала. Важным условием работы ключа является малое сопротивление контакта балки с электродом.

Переключатель находится на копланарной линии передач. Она состоит из трех проводников, из которых два крайних заземлены, а через центральный проводник проходит коммутируемый сигнал, см. рис. 2. Такая конструкция себя хорошо зарекомендовала и используется во многих МЭМС-переключателях [10–12], поскольку является более удобной в изготовлении по сравнению с микрополосковой линией.

Аналитический расчет отношения емкостей проводится по формуле (1), выведенной в нашей предыдущей работе [13]:

* matvey1991@mail.ru

† i.v.uvarov@bk.ru

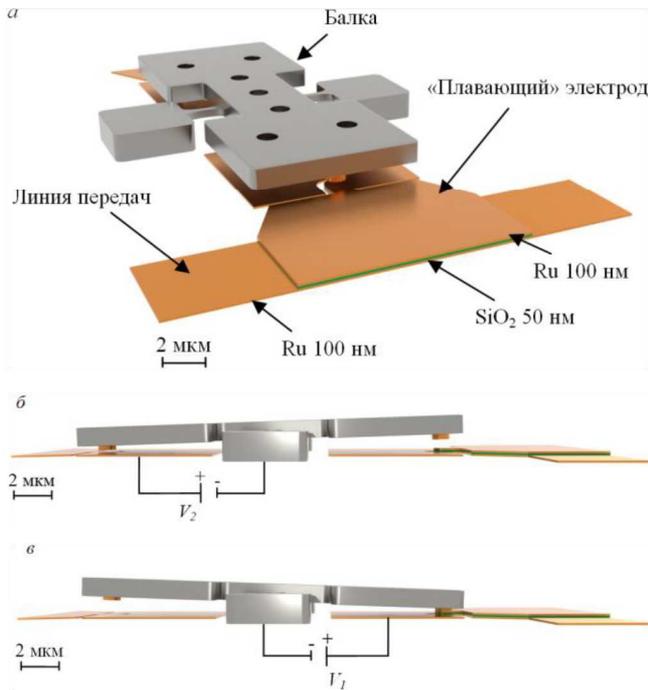


Рис. 1. Резистивно-емкостной МЭМС-переключатель: *a* — схематичное изображение конструкции, *б* — замкнутое состояние (up-state), *в* — разомкнутое состояние (down-state)

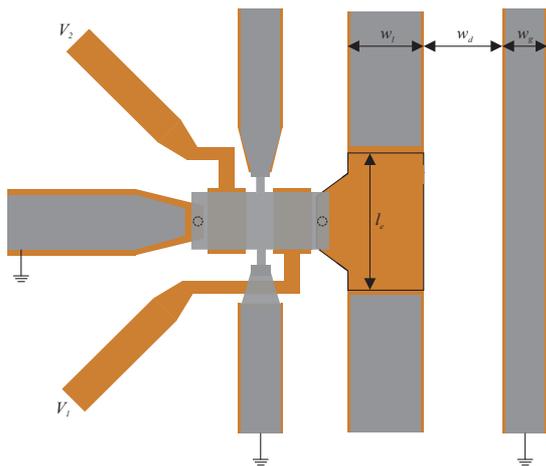


Рис. 2. Переключатель, встроенный в линию передач

$$\frac{C_{down}}{C_{up}} = \epsilon_r \frac{l_e w_l g - t_d - t_e}{t_d}, \quad (1)$$

где g — воздушный зазор между балкой и «плавающим» электродом, ϵ_r — диэлектрическая проницаемость изолятора, w_b и w_l — ширина балки и линии передач соответственно, l_e — длина электрода с «плавающим» потенциалом, S — площадь перекрытия балки с электродом, t_d и t_e — толщина диэлектрика под электродом и самого электрода соответственно.

Расчет по формуле (1) дает сверхвысокое отношение

емкостей 1.5×10^5 , которое на четыре порядка превышает отношение емкостей переключателей классической конструкции. Однако он не учитывает паразитную емкость чипа. Для учета паразитных связей была создана модель реальной конструкции образца и проведены расчеты методом конечных элементов.

2. Расчет методом конечных элементов

2.1 Модель переключателя

Модель переключателя представляет собой подложку площадью $9.6 \times 4.3 \text{ мм}^2$ и толщиной 460 мкм, покрытую слоем SiO_2 толщиной 1 мкм, см. рис. 3. На изолирующем слое сформирована линия передач длиной 7.2 мм с контактными площадками площадью $1 \times 1 \text{ мм}^2$ для центрального проводника и $1.4 \times 1.4 \text{ мм}^2$ для заземленных проводников. Относительно большой размер площадок обусловлен необходимостью приварки электрических выводов. Для ускорения расчета момент замыкания и размыкания ключа под действием управляющих напряжений не моделировался. Вместо этого контакт балки с электродом создавался путем увеличения высоты контактного выступа, имеющего форму цилиндра. Коммутируемый и управляющие электроды не были включены в модель. При этом модель располагалась в воздушном объеме размером $9.6 \times 4.3 \times 1 \text{ мм}^3$.

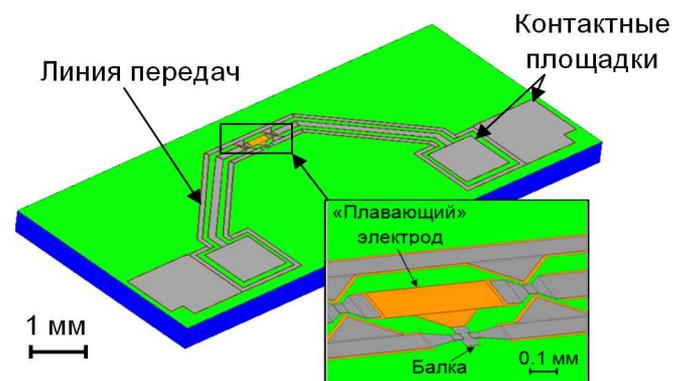


Рис. 3. Модель переключателя

2.2 Отношение емкостей

Зависимость емкостных характеристик от удельного сопротивления кремниевой подложки ρ представлена на рис. 4. Увеличение ρ снижает C_{down} и C_{up} за счет уменьшения паразитной емкости. Отношение емкостей при этом возрастает и достигает 7.4 для высокоомного кремния с $\rho = 50 \text{ кОм}\cdot\text{см}$. Тем не менее, величина C_{down}/C_{up} остается низкой вследствие большой емкости $C_{up} = 7.3 \text{ пФ}$, обусловленной высокой паразитной составляющей. Диэлектрические подложки значительно увеличивают отношение емкостей по

сравнению с кремнием, см. таблицу. Наибольшее значение $C_{down}/C_{up} = 46.1$ обеспечивает боросиликатное стекло Borofloat 33, в то время как сапфировая подложка дает отношение емкостей 27.7. Таким образом, предлагаемый ключ имеет в несколько раз большее C_{down}/C_{up} в сравнении с емкостными переключателями стандартной конфигурации.

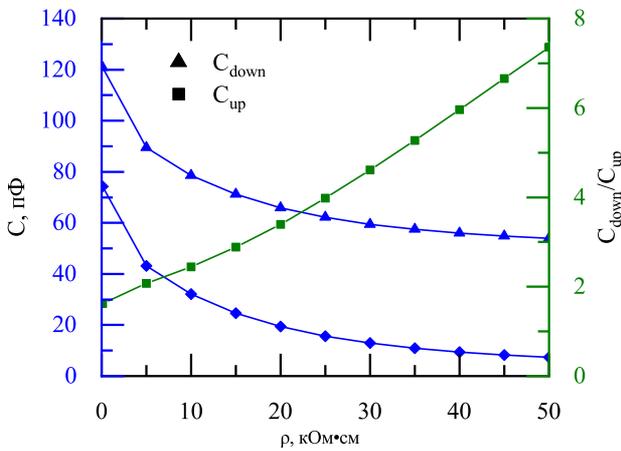


Рис. 4. Зависимость емкостных характеристик переключателя от удельного сопротивления подложки

2.3 Изоляция и вносимые потери

Следующим этапом моделируются изоляция и вносимые потери. Переключатель представляет собой двухпортовую систему, показанную на рис. 5. Для такой системы вносимые потери и изоляция описываются параметром S_{21} в разомкнутом и замкнутом состоянии, который задается выражением (2) [14]:

$$|S_{21}|^2 = \frac{4}{\omega^2 C_{down}^2 Z_0^2}, \quad (2)$$

где Z_0 — импеданс линии передач, ω — частота коммутируемого сигнала.

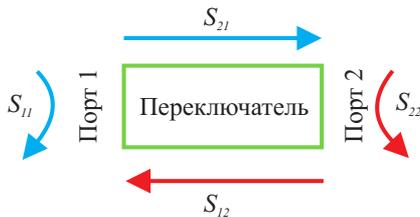


Рис. 5. Схема двухпортовой системы

Измерения данных параметров проводились в диапазоне частот коммутируемого сигнала ω от 1 до 20 ГГц. В расчете использовались подложки из стекла, сапфира и высокоомного кремния с $\rho = 5$ кОм·см. Был

исключен из рассмотрения низкоомный кремний, поскольку он дает малое отношение емкостей, а также высокоомный кремний с $\rho = 50$ кОм·см вследствие его дороговизны и труднодоступности. Для всех подложек наблюдается тенденция к снижению изоляции с увеличением частоты, см. рис. 6. Кремний и сапфир демонстрируют близкие значения изоляции во всем диапазоне частот, а стекло обеспечивает заметно лучшую изоляцию в интервале 3–16 ГГц. Как и в случае изоляции, кремний и сапфир дают схожие результаты по вносимым потерям, которые не превышают 0.8 дБ во всем диапазоне частот. Для стеклянной подложки характерны сильные колебания потерь с ростом частоты и большие пиковые значения, достигающие 1.6 дБ. Приемлемыми значениями S -параметров считаются значения более 15 дБ для изоляции и менее 1 дБ для вносимых потерь. Переключатель, изготовленный на стекле, обеспечивает указанные характеристики в диапазоне частот от 1 до 12 ГГц. Переключатели, изготовленные на сапфире и кремнии, имеют рабочий диапазон 1–10 ГГц и 1–9 ГГц, соответственно.

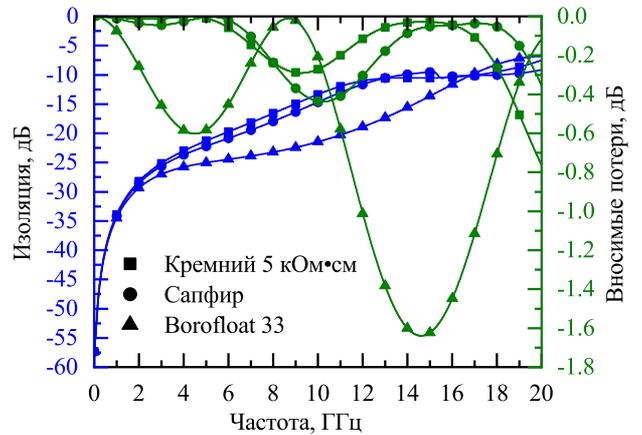


Рис. 6. Зависимость изоляции и вносимых потерь от частоты коммутируемого сигнала

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен комбинированный резистивно-емкостной МЭМС-переключатель, оснащенный электродом с плавающим потенциалом и обеспечивающий увеличенное отношение емкостей. Методом конечных элементов рассчитаны емкостные характеристики переключателя, а также изоляция и вносимые потери в диапазоне частот 1–20 ГГц. Использование низкоомного кремния в качестве материала подложки дает малое отношение емкостей 1.6. Увеличение удельного сопротивления до 50 кОм·см увеличивает C_{down}/C_{up} до 7.4. Диэлектрические подложки из сапфира и боросиликатного стекла дают еще большие значения, со-

Таблица. Свойства подложек и емкостные характеристики переключателя

Материал	ε_r	Электрическое сопротивление ρ , Ом·см	C_{down} , пФ	C_{up} , пФ	C_{down}/C_{up}
Низкоомный Si	11.7	12	120.89	74.25	1.6
Высокоомный Si	11.7	5×10^3	89.44	43.18	2.1
		50×10^3	53.94	7.33	7.4
Сапфир	9.3	10^{16}	48.45	1.75	27.7
Borofloat 33	4.6	10^8	47.74	1.03	46.1

ставляющие 27.7 и 46.1 соответственно. Переключатель на сапфировой подложке обеспечивает приемлемую изоляцию более 15 дБ и вносимые потери менее 1 дБ в диапазоне частот 1–10 ГГц. Подложка из боросиликатного стекла позволяет увеличить рабочий диапазон до 12 ГГц.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФТИАН им. К.А. Валиева РАН Минобрнауки РФ по теме № FFNN-2022-0017 при финансовой поддержке гранта Фонда содействия инновациям № 18ГУЭС18/91354.

- [1] Grichener A., Rebeiz G.M. // IEEE Trans. Microw. Theory Techn. **58**. 2692. (2010).
- [2] Yang H.-H., Zareie H., Rebeiz G.M. // J. Microelectromech. Syst. **24**. 599. (2015).
- [3] Reines I., Pillans B., Rebeiz G.M. // J. Microelectromech. Syst. **20**, N 1. 193. (2010).
- [4] Zareie H., Rebeiz G.M. // IEEE Trans. Microw. Theory Techn. **61**, N 1. 455. (2012).
- [5] Maninder K., Bansal D., Soni S. et al. // Microsyst. Technol. **25**. 729. (2019).
- [6] Tsaor J., Onodera K., Kobayashi T. et al. // Sens. Actuators A: Phys. **121**, N 1. 275. (2005).
- [7] Ganesh G.V., Karumuri S.R. // Wireless Personal Communications. **1**. (2024).
- [8] Uvarov I.V., Marukhin N.V., Shlepakov P.S. et al. // Russ. Microelectron. **49**. 253. (2020).
- [9] Tkachenko A., Lysenki I., Kovalev A. // Micromach. **14**, N 2. 477. (2023).
- [10] Persano A., Quaranta F., Cola A. et al. // Proc. SPIE. **8066**. 80660V-1.(2011).
- [11] He X.J., Lv Z.Q., Liu B., Li Z.H. // Sens. Actuators A: Phys. **188**. 342. (2012).
- [12] Gopalakrishnan S., DasGupta A., Nair D.R. // J. Micromech. Microeng. **27**, N 9. 095013. (2017).
- [13] Morozov M.O., Uvarov I.V. // Russ. Microelectron. **52**, N 6. 493. (2023).
- [14] Rao K.S., Thalluri L.N., Guha K., Sravani K.G. // IEEE Access. **6**. 77516 (2018).

Combined resistive-capacitive MEMS-switch for advanced communication systems

M.O. Morozov^{1,2,a}, I.V. Uvarov^{2,b}

¹P.G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, 150003, Russia

²Valiev Institute of Physics and Technology of Russian Academy of Sciences

Yaroslavl Branch, Yaroslavl, 150067 Russia

E-mail: ^amatvey19991@mail.ru, ^bi.v.uvarov@bk.ru

The main characteristic of a MEMS switch is the ratio of capacitances in the open and closed states. In conventional switches, this ratio usually does not exceed ten and can be increased several times by using a floating potential electrode. The dependence of the capacitive characteristics, isolation and insertion loss of a switch with the «floating» electrode on the substrate material is investigated.

PACS: 85.85.+j

Keywords: MEMS-switch, capacitance ratio, isolation, insertion loss, floating potential, finite element method.

Received 03 June 2024.

Сведения об авторах

1. Морозов Матвей Олегович — магистр 2 года обучения, мл. науч. сотрудник; e-mail: matvey19991@mail.ru.

2. Уваров Илья Владимирович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, доцент; e-mail: i.v.uvarov@bk.ru.