

МЭМС-переключатель с увеличенным отношением емкостей для передовых радиоэлектронных систем

М. О. Морозов,^{1,2*} И. В. Уваров^{2†}

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

²ЦНИТ — Ярославль ОФТИ им. К.А. Валиева НИЦ «Курчатовский институт»
Россия, 150067, Ярославль, Университетская ул., д. 21

(Поступила в редакцию 02.06.2025; подписана в печать 23.06.2025)

МЭМС-переключатели имеют широкий потенциал применения в перспективных системах связи, однако их внедрению препятствует ряд особенностей. Отношение емкостей в разомкнутом и замкнутом состоянии обычно составляет несколько единиц и не обеспечивает требуемых характеристик. Отношение емкостей может быть многократно увеличено за счет использования дополнительного электрода, нанесенного поверх диэлектрического слоя. В данной работе проводится расчет емкостных и радиочастотных характеристик переключателя с дополнительным электродом.

PACS: 85.85.+j

УДК: 621.3.

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

ВВЕДЕНИЕ

Передовые радиоэлектронные системы, в том числе сети мобильной связи 5G с диапазонами частот $\pi 78$ (3.4–3.8 ГГц) и $\pi 79$ (4.8–4.9 ГГц), требуют применения переключателей с малыми вносимыми потерями и высокой изоляцией. Также переключатели должны коммутировать сигналы большой мощности, обладать высокой скоростью переключения и малым напряжением срабатывания. Широко применяемые полупроводниковые ключи обладают высоким быстродействием и надежностью благодаря отсутствию подвижных механических элементов, однако для них характерны высокие потери сигнала и энергопотребление. Альтернативой являются микроэлектромеханические переключатели (МЭМС-переключатели). Они представляют собой миниатюрные электромеханические реле, изготовленные с использованием технологий микроэлектроники. Малые вносимые потери и высокая изоляция сочетаются в них с компактными габаритами, низким энергопотреблением и высоким быстродействием, что делает такие устройства перспективными для использования в передовых системах связи.

Важной характеристикой МЭМС-переключателя с емкостным контактом является отношение емкостей в разомкнутом и замкнутом состояниях, которое обычно составляет несколько единиц [1–4] и не обеспечивает требуемый эффект переключения. Улучшить эту характеристику можно несколькими способами, среди которых наиболее распространенными являются использование диэлектриков с высоким значением диэлектрической проницаемости, уменьшение толщины диэлектрического слоя и увеличение воздушного зазора между электродами [5–8]. Однако применение

нестандартных диэлектриков требует сложных и дорогостоящих методов формирования слоев, таких как атомно-слоевое осаждение. Увеличение воздушного зазора ведет к росту напряжения срабатывания, а уменьшение толщины диэлектрического слоя увеличивает вероятность его пробоя.

Другой эффективный метод увеличения отношения емкостей заключается в нанесении дополнительного электрода поверх диэлектрика. Этот подход лишен указанных недостатков и позволяет варьировать отношение емкостей в широких пределах без изменения конструкции подвижной части. Настоящая работа посвящена исследованию рабочих характеристик ключа с дополнительным электродом и оптимизации размеров электрода для эффективной работы в сетях 5G.

1. ПРИНЦИП РАБОТЫ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯ

МЭМС-переключатель схематично изображен на рис. 1, а, б. Подвижная часть представляет собой алюминиевый кантилевер длиной 50 мкм, закрепленный на заземленном проводнике копланарной линии передач. Под кантилевером на расстоянии 1 мкм проходит сигнальный проводник, на котором сформирован слой оксида кремния и дополнительный электрод из рутения. В замкнутом состоянии кантилевер находится в горизонтальном положении (рис. 1, в). Емкость между сигнальным и заземленными проводниками C_{up} мала, поэтому сигнал проходит по линии передач с минимальными потерями. Ключ замыкают путем подачи напряжения на электрод управления. Под действием электростатической силы кантилевер изгибается и приходит в контакт с дополнительным электродом. Емкость между сигнальным и заземленными проводниками существенно возрастает благодаря конденсатору большой емкости C_{down} , обкладками которого являются сигнальный проводник и дополнительный электрод.

* matvey19991@mail.ru

† i.v.uvarov@bk.ru

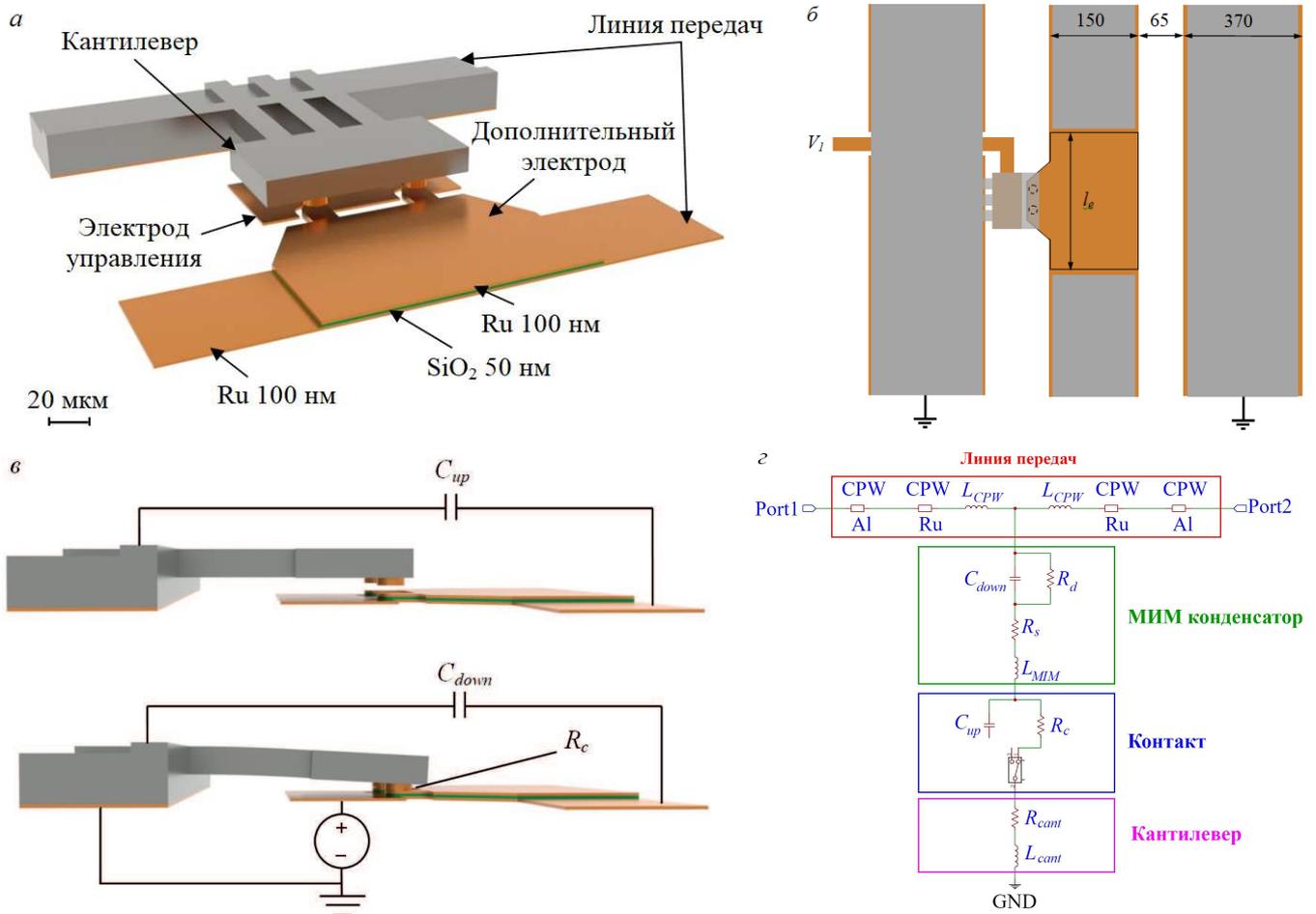


Рис. 1. МЭМС-переключатель с дополнительным электродом: *a* — общий вид, *б* — вид сверху, *в* — замкнутое и разомкнутое состояние, *г* — эквивалентная схема

Таким образом, переключатель шунтирует сигнальный проводник и блокирует прохождение сигнала. Необходимым условием работы ключа является малое сопротивление контакта кантилевера с электродом.

Эквивалентная схема переключателя (рис. 1, *г*) учитывает четыре структурных элемента: линию передач, состоящую из слоев рутения и алюминия; конденсатор металл–изолятор–металл (МИМ) емкостью C_{down} ; область контакта кантилевера с дополнительным электродом, в верхнем положении представляющую собой емкость C_{up} , а в нижнем положении — контактное сопротивление R_c ; кантилевер. Схема используется для выбора оптимальных размеров линии передач. Импеданс 50 Ом достигается при ширине центрального проводника $w_l = 150$ мкм и воздушном зазоре между проводниками 65 мкм.

Отношение емкостей задается следующим выражением [9]:

$$\frac{C_{down}}{C_{up}} = \varepsilon \frac{l_e \omega_l g - t_d - t_e}{S t_d}, \quad (1)$$

где $\varepsilon = 3.9$ — диэлектрическая проницаемость SiO_2 , $l_e = 400$ мкм — длина дополнительного электрода, $S =$

178.5 мкм^2 — площадь перекрытия кантилевера с электродом, $g = 1$ мкм — воздушный зазор между кантилевером и сигнальным проводником, $t_d = 0.05$ мкм и $t_e = 0.1$ мкм — толщина диэлектрика и электрода соответственно. Согласно выражению (1), отношение емкостей составляет 2×10^4 и на три порядка превышает C_{down}/C_{up} стандартных переключателей. Однако расчет не учитывает паразитную емкость линии передач и контактных площадок. Для ее учета используют метод конечных элементов.

2. РАСЧЕТ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Модель включает в себя сапфировую подложку площадью $1.7 \times 1.6 \text{ мм}^2$ и толщиной 460 мкм, см. рис. 2. На подложке сформирована копланарная линия передач, состоящая из слоев рутения и алюминия толщами 0.1 и 3 мкм соответственно. Кантилевер расположен в центральной области чипа, а электрод управления соединен с контактной площадкой на периферии. Для увеличения скорости расчета и уменьшения

требований к вычислительной мощности изгиб кантилевера под действием электростатической силы не моделируют. Смену состояния ключа имитируют путем изменения высоты контактных выступов на нижней поверхности кантилевера.

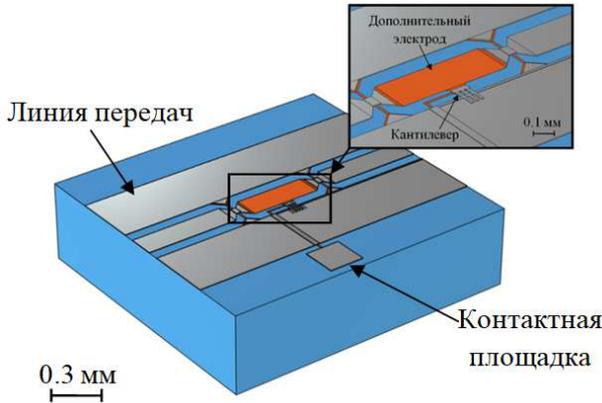


Рис. 2. Модель переключателя

Расчетные значения C_{down} и C_{up} составляют 40.66 пФ и 0.14 пФ. Отношение емкостей равняется 290 и более чем на порядок превосходит величину, характерную для переключателей без дополнительного электрода. Радиочастотные характеристики показаны на рис. 3, а. Требуемые вносимые потери менее 0.15 дБ и изоляция более 20 дБ обеспечиваются в диапазоне частот 1.3-4.8 ГГц, не включающем верхнюю часть целевого диапазона. Для сдвига рабочего диапазона вверх необходимо увеличить резонансную частоту f_0 , на которой изоляция имеет максимальную величину. Эта частота задается выражением [10]:

$$f_0 \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_{MIM} + L_{cant})C_{down}}}, \quad (2)$$

где L_{MIM} и L_{cant} — индуктивность МИМ конденсатора и кантилевера. Увеличивать f_0 удобно путем сокращения длины дополнительного электрода, которое снижает емкость МИМ конденсатора. Резонансная частота для $l_e = 200$ мкм составляет 3.4 ГГц, а требуемые характеристики достигаются в диапазоне 2.1–5.7 ГГц, полностью охватывающем рабочие частоты сетей связи 5G.

Сокращение длины дополнительного электрода уменьшает отношение емкостей, как показано на рис. 3, б. Тем не менее, C_{down}/C_{up} остается достаточно большим и составляет 146 для $l_e = 200$ мкм. Изменение размеров электрода оказывает минимальное влияние на пиковую изоляцию и вносимые потери.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен МЭМС-переключатель с дополнительным электродом, предназначенный для ра-

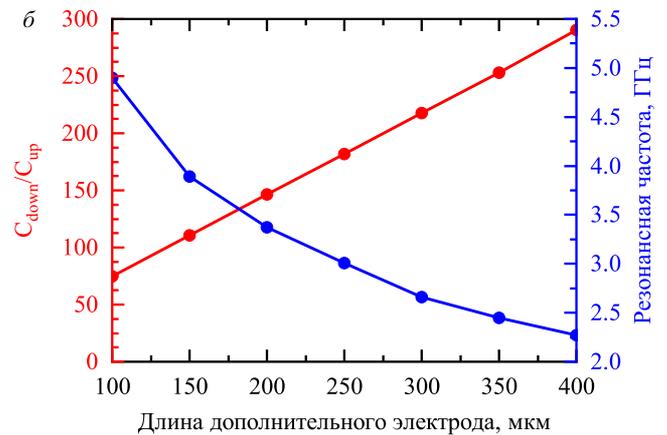
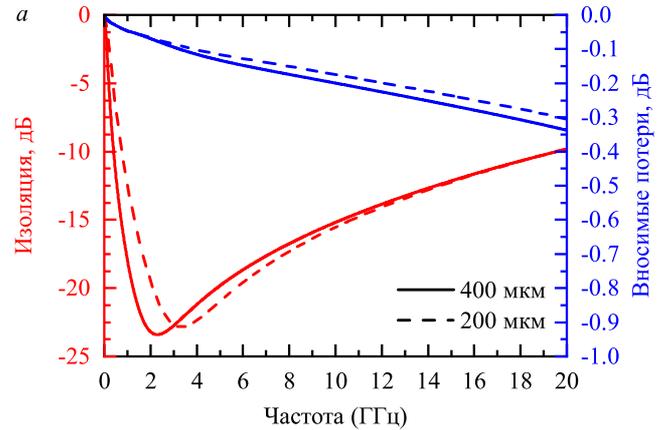


Рис. 3. а — Зависимость радиочастотных характеристик от частоты коммутируемого сигнала при разной длине дополнительного электрода; б — зависимость отношения емкостей и резонансной частоты от длины дополнительного электрода

боты в сетях связи 5G. Методом конечных элементов рассчитаны его емкостные характеристики, а также изоляция и вносимые потери в диапазоне частот до 20 ГГц. Ключ с длиной дополнительного электрода 400 мкм обеспечивает отношение емкостей 290, что более чем на порядок превосходит C_{down}/C_{up} переключателей без дополнительного электрода. Однако допустимые вносимые потери менее 0.15 дБ и изоляция более 20 дБ достигаются в диапазоне 1.3–4.8 ГГц, не включающем верхнюю часть целевого диапазона. Увеличение рабочих частот до 2.1–5.7 ГГц достигается путем сокращения длины дополнительного электрода до 200 мкм. При этом отношение емкостей остается достаточно высоким и составляет 146.

Работа выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

- [1] *Blondy P., Crunteanu A., Champeaux C. et al. // 2004 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (IEEE Cat. No. 04CH37535). 2004. 2. P. 573.*
- [2] *Grichener A., Rebeiz G.M. // IEEE Trans. Microw. Theory Techn. 58. 2692 (2010).*
- [3] *Zereie H., Rebeiz G.M. // IEEE Trans. Microw. Theory Techn. 61, N1. 455 (2012).*
- [4] *Yang H.H., Zareie H., Rebeiz G.M. // J. Micromech. Syst. 24, N3. 599 (2014).*
- [5] *He X. J., Lv Z. Q., Liu B., Li Z.H. // Sens. Actuators, A: Physical. 188. 342 (2012).*
- [6] *Choi S.J., Han C.H., Yang H.H. et al. // J. Micromech. Syst. 24, N4. 1006 (2014).*
- [7] *Shekhar S., Vinoy K.J., Ananthasuresh G.K. // J. Micromech. Microeng. 28, N7. 075012 (2018).*
- [8] *Mafinejad Y., Ansari H.R., Khosroabadi S. // Microsyst. Technol. 26. 1253 (2020).*
- [9] *Morozov M.O., Uvarov I.V. // Russian Microelectronics. 52, N6. 493 (2023).*
- [10] *Zhang Y., Liu H., Sun J., Liu Z. // IEEE Access. 10. 37360 (2022).*

MEMS switch with enhanced capacitive ratio for advanced electronic systems

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

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

²*NRC «Kurchatov Institute» – Valiev IPT, Yaroslavl Branch, Yaroslavl 150067, Russia
E-mail: ^amatvey19991@mail.ru, ^bi.v.uvarov@bk.ru*

MEMS switches have great potential for use in advanced radar and communication systems, but their practical implementation is limited by several factors. The capacitance ratio in the closed and open state is usually several units, which does not meet the desired specifications. By adding an intermediate electrode on top of the dielectric layer, the capacitance ratio can be significantly increased. In this study, the capacitive and radio-frequency characteristics of a switch with an intermediate electrode are calculated.

PACS: 85.85.+j.

Keywords: MEMS switch, capacitance ratio, isolation, insertion loss, intermediate electrode, finite element method.

Received 02 June 2025.

Сведения об авторах

1. Морозов Матвей Олегович — аспирант 1 года обучения, мл. науч. сотрудник; . e-mail: matvey19991@mail.ru.
2. Уваров Илья Владимирович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; . e-mail: i.v.uvarov@bk.ru.