

## Раздел I. Электроника и нанотехнологии

УДК 621.318.51, 621.3.049.7

DOI 10.23683/2311-3103-2018-2-6-16

И.Е. Лысенко, А.В. Ткаченко

### РАЗРАБОТКА ВЧ МЭМС-ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯ ЕМКОСТНОГО ТИПА С ПЕРФОРИРОВАННОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МЕМБРАНОЙ

*МЭМС-переключатели с электростатическим механизмом активации применимы для  $m$ - и  $\mu$ -волной области. Металлические части переключателя висят над нижним металлическим электродом, образуя конденсатор с двумя параллельными пластинами. При подаче напряжения смещения между верхним и нижним электродами происходит перераспределение зарядов, приводящее к появлению электростатических сил между металлическими поверхностями. Эти силы, вне зависимости от полярности приложенного напряжения, заставляют свободно подвешенный контакт двигаться по направлению к нижнему электроду. Поскольку металлическая мембрана (или балка) начинают прогибаться, в ней возникают силы упругости, направленные в противоположных напряжениях. Как только приложенная сила достигает порогового значения срабатывания, что происходит, когда электростатические силы становятся больше сил упругости, консоль резко падает на нижний электрод, замыкая при этом электрические контакты. Консоль возвращается в исходное положение после того, как приложенное напряжение станет ниже порогового значения размыкания контактов, которое обычно бывает много ниже напряжения срабатывания. Подобное гистерезисное поведение характерно для всех микропереключателей. На передний план выходят два основных типа МЭМС-переключателей: последовательные переключатели контакта «металл-металл» и параллельные емкостные переключатели. Параллельный емкостный МЭМС-переключатель в основном состоит из металлического моста, копланарного волновода с заземляющим сигналом и диэлектрического слоя, размещенного на нижнем электроде, который является частью сигнальной линии. Параллельные емкостные МЭМС-переключатели обладают рядом преимуществ перед PIN-диодами, а именно: имеют малую потребляемую мощность (мкДж в процессе коммутации), большой коэффициент емкости (20–100), может быть изготовлен на подложке практически из любого материала. Однако они не лишены недостатков, главными из которых являются: относительно низкая скорость переключения (2–10 мкс), высокое напряжение смещения (15–80 В), а также коммутация приложений высокой мощности ( $> 2$  Вт). Эти недостатки могут быть допустимыми во множестве применений, например, телекоммуникационные коммутаторы с высокой изоляцией и низкими потерями, радары с относительно низкой скоростью сканирования. Актуальной темой для исследования представляется разработка конструкции емкостного ВЧ МЭМС-переключателя с высокой скоростью коммутации ( $\leq 5$  мкс), низким напряжением смещения ( $\leq 5$  В), а также изучение его радиочастотных и электромагнитных характеристик. В статье представлен подход к определению полной емкости разработанного МЭМС-переключателя с учетом перфорации в виде квадратных отверстий.*

*ВЧ МЭМС; параллельный переключатель емкостного типа; перфорация; металлическая мембрана с перфорированными отверстиями; полная емкость с учетом перфорации.*

I.E. Lysenko, A.V. Tkachenko

**DEVELOPMENT OF THE RF MEMS SWITCH OF CAPACITIVE TYPE WITH A PERFORATED METAL MEMBRANE**

*MEMS switches with electrostatic activation mechanism are applicable to  $m$ - and  $\mu$ -wave spectrum. The metal parts of the switch hang over the lower metal electrode forming a capacitor with two parallel plates. When the offset voltage is applied between the upper and lower electrodes, the charges are redistributed, that leads to the appearance of electrostatic forces between the metal surfaces. These forces, regardless of the polarity of the applied voltage, force the freely suspended contact to move towards the lower electrode. As the metal membrane (or beam) begins to bend, appear elastic forces, directed in opposite stresses. As soon as the applied force reaches the threshold value, that happens when the electrostatic forces become more than elastic forces, the console falls sharply on the lower electrode, locking the electrical contacts. The console returns to its original position after the applied voltage falls below the threshold value of contact separation, which is usually much lower than voltage operation. Such hysteretic behavior is a characteristic of all micro switches. Two basic types of MEMS switches come to the fore: serial "metal-to-metal" contact switches and parallel (shunt) capacitive switches. Mainly a parallel capacitive MEMS switch consists of a metal bridge, a coplanar waveguide with a grounding signal and a dielectric layer placed on the lower electrode, which is a part of the signal line. Parallel capacitive MEMS switches have a number of advantages over PIN diodes, namely: they have low power consumption ( $\mu$ j during switching), high capacitance factor (20–100), can be made on a substrate of almost any materials. However, they are not devoid of disadvantages, the main of which are: relatively low switching speed (2–10  $\mu$ s), high offset voltage (15–80 V), as well as high power switching applications ( $> 2$  W). These disadvantages can be acceptable in a variety of applications, such as high-isolation and low-loss telecommunications switches, and relatively low-speed radars. The actual issue for the study is the development of the design of capacitive RF MEMS switch with high switching speed ( $\leq 5$   $\mu$ s), low offset voltage ( $\leq 5$  V), as well as the study of its radio frequency and electromagnetic characteristics. The article presents an approach to determining the full capacity of the developed MEMS switch taking into account perforation in the form of square holes.*

*RF MEMS parallel switch capacitive type; perforated; metal membrane with perforated holes; full capacity based on punching..*

**Введение.** МЭМС-переключатели с электростатическим механизмом активации применимы для  $m$ - и  $\mu$ -волновой области представлены в работах [1–4]. Металлические части переключателя висят над нижним металлическим электродом, образуя конденсатор с двумя параллельными пластинами. При подаче напряжения смещения между верхним и нижним электродами происходит перераспределение зарядов, приводящее к появлению электростатических сил между металлическими поверхностями. Эти силы, вне зависимости от полярности приложенного напряжения, заставляют свободно подвешенный контакт двигаться по направлению к нижнему электроду. Поскольку металлическая мембрана (или балка) начинают прогибаться, в ней возникают силы упругости, направленные в противоположных напряжениях. Как только приложенная сила достигает порогового значения срабатывания, что происходит, когда электростатические силы становятся больше сил упругости, консоль резко падает на нижний электрод, замыкая при этом электрические контакты. Консоль возвращается в исходное положение после того, как приложенное напряжение станет ниже порогового значения размыкания контактов, которое обычно бывает много ниже напряжения срабатывания. Подобное гистерезисное поведение характерно для всех микропереключателей.

На передний план выходят два основных типа МЭМС-переключателей: последовательные переключатели контакта «металл-металл» [3] и параллельные емкостные переключатели [2]. Параллельный емкостный МЭМС-переключатель в основном состоит из металлического моста, копланарного волновода с заземляющим сигналом и диэлектрического слоя, размещенного на нижнем электроде, который является частью сигнальной линии, как видно на рис. 1.

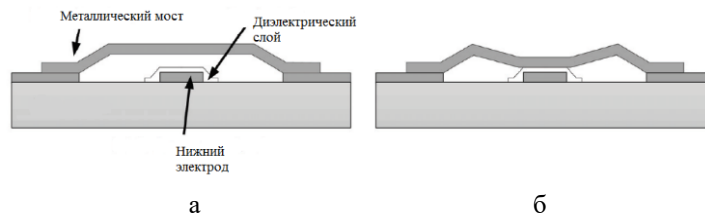


Рис. 1. Принцип действия ВЧ МЭМС-переключателя емкостного типа:  
 а – выключенное состояние; б – включенное состояние

Диэлектрический слой использован для предотвращения короткого замыкания между верхней подвижной балкой переключателя и нижним электродом. В выключенном состоянии подвижная балка переключателя подвешивается над диэлектрическим слоем с воздушным зазором, что делает переключатель почти открытым. Однако, когда напряжение смещения подается на нижний электрод, подвижная балка переключателя падает на слой диэлектрика за счет электростатических сил между мостом переключателя и нижним электродом. В выключенном состоянии (металлический мост вверх), переключатель характеризуется малой емкостью; во включенном состоянии переключателя (металлический мост вниз) емкость увеличивается с коэффициентом 20–100 [4].

Параллельные емкостные МЭМС-переключатели обладают рядом преимуществ перед PIN-диодами, а именно: имеют малую потребляемую мощность (мкДж в процессе коммутации), большой коэффициент емкости ( $\frac{C_{down}}{C_{up}} = 20 - 100$ ), может быть изготовлен на подложке практически из любого материала. Однако они не лишены недостатков, главными из которых являются: относительно низкая скорость переключения (2–10 мкс), высокое напряжение смещения (15–80 В), а также коммутация приложений высокой мощности (> 2 Вт). Эти недостатки могут быть допустимыми во множестве применений, например, телекоммуникационные коммутаторы с высокой изоляцией и низкими потерями, радары с относительно низкой скоростью сканирования [5].

Актуальной темой для исследования представляется разработка конструкции емкостного ВЧ МЭМС-переключателя с высокой скоростью коммутации ( $\leq 5$  мкс), низким напряжением смещения ( $\leq 5$  В), изучение радиочастотных и электромагнитных характеристик.

В статье представлен подход к определению полной емкости разработанного МЭМС-переключателя с учетом перфорации в виде квадратных отверстий.

На рис. 2 и рис. 3, 4 показаны топология и вид сбоку параллельного емкостного МЭМС-переключателя. Переключатель содержит копланарную линию передач, металлическую мембрану (мост), четыре балки в виде меандра (выполняющие роль пружины), две якорные области. Форма балки в виде меандры позволяет нейтрализовать эффекты остаточного напряжения. Копланарная линия передач (КЛП) состоит из трех линий: две линии заземления, сигнальная линия. Металлическая мембрана подвешена над линией передач на четырех балках, закрепленных на якорной области на заземляющих линиях КЛП. Диэлектрический слой, который выступает в качестве активирующего электрода, осаждается на сигнальной линии КЛП.

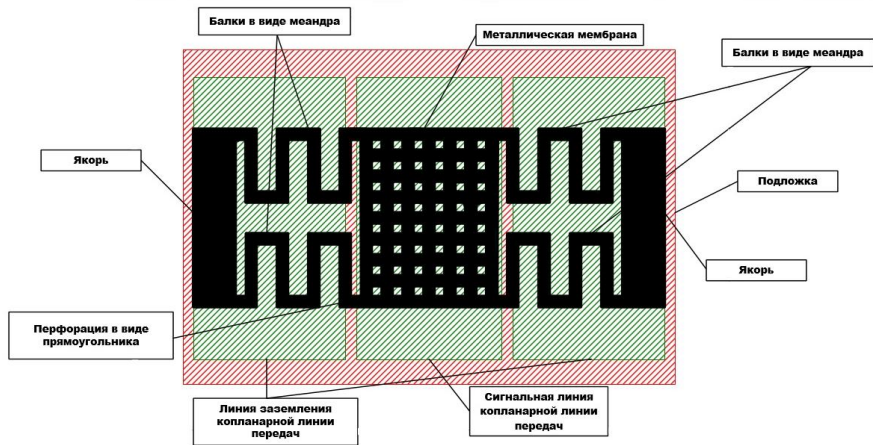


Рис. 2. Топология параллельного емкостного МЭМС-переключателя

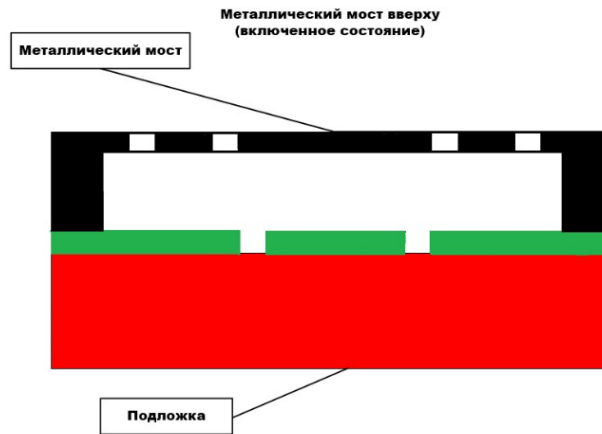


Рис. 3. Вид сбоку параллельного емкостного МЭМС-переключателя

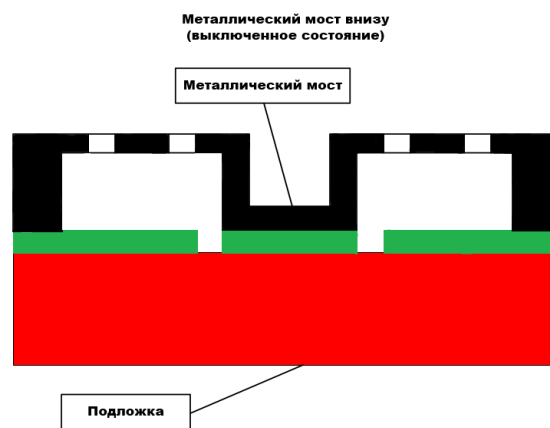


Рис. 4. Вид сбоку параллельного емкостного МЭМС-переключателя

Как показано на рис. 3 переключатель находится в включенном состоянии без какого-либо приложенного напряжения. Металлическая мембрана поддерживается в верхнем положении на жестких балках, имеющих форму меандра, а ВЧ-сигнал может распространяться по сигнальной линии КЛП. На рис. 4 переключатель находится в выключенном состоянии с приложенным напряжением. Металлическая мембрана находится в нижнем положении под действием электростатической силы.

Материалы, используемые в проектируемом МЭМС-переключателе представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Материалы проектируемого МЭМС-переключателя**

Элемент конструкции	Материал
Сигнальная линия и линия заземления КЛП	Медь ( <i>Cu</i> )
Металлическая мембрана (мост)	Золото ( <i>Au</i> )
Якорь	Золото ( <i>Au</i> )
Активирующий электрод	Нитрид кремния ( <i>Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub></i> )
Балка	Золото ( <i>Au</i> )
Подложка	Стекло

Топологические размеры элементов конструкции проектируемого МЭМС-переключателя представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Топологические размеры элементов конструкции МЭМС-переключателя**

Элемент конструкции	Размеры (длина x ширина x высота), мкм
Сигнальная линия КЛП	220x25x1
Линия заземления КЛП	220x50x1
Металлическая мембрана (мост)	200x25x1
Якорь	200x15x5
Активирующий электрод	200x25x0.1
Балка	60x42x1
Подложка	220x160x100
Воздушный зазор	4
Отверстие в металлической мембране	2x2x1

**Определение зависимости перемещения металлической мембраны от приложенного напряжения смещения.** На рис. 5 представлена одномерная модель проектируемого МЭМС-переключателя. Хотя одномерная модель (1D) не очень точная, но может использоваться для понимания поведения переключателя. В данной модели переключатель рассматривается как единая система массы и пружины; подвижный электрод подвешен над неподвижным над которым находится тонкий слой диэлектрика толщиной  $t_d$  для того, чтобы не допустить прямого контакта.

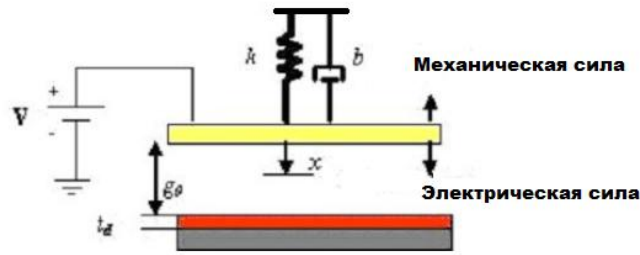


Рис. 5. Одномерная модель МЭМС-переключателя

Время переключения определяется с помощью динамического уравнения движения [6]:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = F_e = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 AV_s^2}{\left(g_0 + \frac{t_d}{\epsilon_r} - x\right)^2}, \quad (1)$$

где  $F_e$  – это электростатическая сила,  $m$  – эффективная масса,  $b$  – коэффициент демпфирования,  $k$  – коэффициент жесткости балки.

Коэффициент жесткости балки, зафиксированной с обоих концов, определяется по следующей формуле [5]:

$$k = \frac{32Ewt^3}{l^3} + \frac{8\sigma(1-\nu)wt}{l}, \quad (2)$$

где  $E$  – модуль Юнга,  $\nu$  – коэффициент Пуассона,  $\sigma$  – остаточное напряжение,  $w$ ,  $l$ ,  $t$  – ширина, длина, высота балки соответственно.

Напряжение смещения можно определить, приравняв электростатическую силу и силу упругости при  $x = (1/3)g_0$  и их производных по  $x$ .

$$F_e + F_s = -\frac{\epsilon_0 AV_s^2}{2(g_0 - x)^2} + kx = 0 \quad (3)$$

$$-\frac{\epsilon_0 AV_s^2}{2(g_0 - x)^2} + x = 0. \quad (4)$$

Решая выражения (3) и (4) при  $x = (1/3)g_0$  можно найти соотношение для определения напряжения смещения:

$$V_{pi} = \sqrt{8kg_0^3/27\epsilon_0 A}. \quad (5)$$

Зависимость перемещения металлической мембраны от приложенного напряжения смещения представлена на рис. 6.

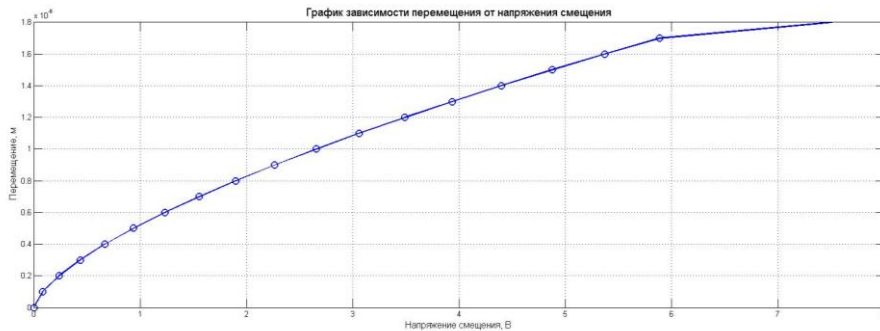


Рис. 6. График зависимости перемещения металлической мембраны от напряжения смещения

Решение динамического уравнения движения (1) и применение напряжений смещения в диапазоне 0–6 В были получены значения для перемещения металлической мембраны МЭМС-переключателя представленные графически на рис. 6.

**Определение емкости параллельного емкостного МЭМС-переключателя с учетом перфорации.** Емкость для параллельной пластина толщиной  $t$ , как показано на рис. 7 определяется выражением [7, 8]:

$$C = \frac{\varepsilon w W}{d} \left[ 1 + \frac{2d}{\pi W} \ln \left( \frac{\pi W}{d} \right) + \frac{2d}{\pi W} \ln \left( 1 + \frac{2t}{d} 2 \sqrt{\frac{t}{d} + \frac{t^2}{d^2}} \right) \right]. \quad (6)$$

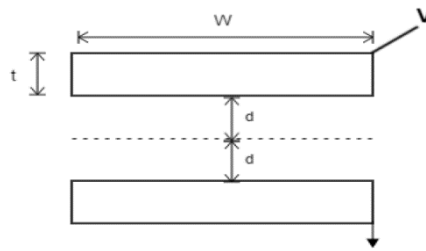


Рис. 7. Параллельные пластины с толщиной  $t$

Выражение (6) имеет три составляющие:

- $\frac{\varepsilon w W}{d}$  – емкость от неперфорированной мембраны;
- $\frac{\varepsilon w W}{d} \frac{2d}{\pi W} \ln \left( \frac{\pi W}{d} \right)$  – емкость окантовочного поля из-за конечных размеров мембраны;
- $\frac{\varepsilon w W}{d} \frac{2d}{\pi W} \ln \left( 1 + \frac{2t}{d} 2 \sqrt{\frac{t}{d} + \frac{t^2}{d^2}} \right)$  – емкость в области окантовки толщины мембраны.



Рис. 8. Топологические размеры квадратных отверстий на подвижной металлической мембране

Каждое из перфорированных квадратных отверстий металлической мембраны (см. рис. 8) может быть определено как отдельный параллельный конденсатор [9–11]. Существует три составляющие емкости: емкость перфорированной металлической мембраны, емкость в области окантовки толщины мембраны и емкость в области окантовки отверстий.

Общая емкость = (емкость от неперфорированной мембраны, включая окантовочное поле) – (емкость из-за отверстий без окантовочного поля) + (емкость окантовочного поля отверстий) =  $(a) - (b) + (c)$

где  $(a) = \frac{\varepsilon w W}{(d + \frac{t_d}{\varepsilon_r})} + \frac{2\varepsilon w}{\pi} \left[ \ln \left( \frac{\pi W}{(d + \frac{t_d}{\varepsilon_r})} \right) + \ln \left( 1 + \frac{2t_b}{(d + \frac{t_d}{\varepsilon_r})} 2 \sqrt{\frac{t_b}{(d + \frac{t_d}{\varepsilon_r})} + \frac{t_b^2}{(d + \frac{t_d}{\varepsilon_r})^2}} \right) \right];$

$(b) = n_l n_w \frac{\varepsilon w h^2}{(d + \frac{t_d}{\varepsilon_r})};$

$(c) = \frac{2n_l n_w \varepsilon w h}{\pi} \left[ \ln \left( \frac{\pi W}{(d + \frac{t_d}{\varepsilon_r})} \right) + \ln \left( 1 + \frac{2t_b}{(d + \frac{t_d}{\varepsilon_r})} + 2 \sqrt{\frac{t_b}{(d + \frac{t_d}{\varepsilon_r})} + \frac{t_b^2}{(d + \frac{t_d}{\varepsilon_r})^2}} \right) \right].$

Зависимость емкости параллельного емкостного МЭМС-переключателя с учетом перфорации представлена на рис. 9.

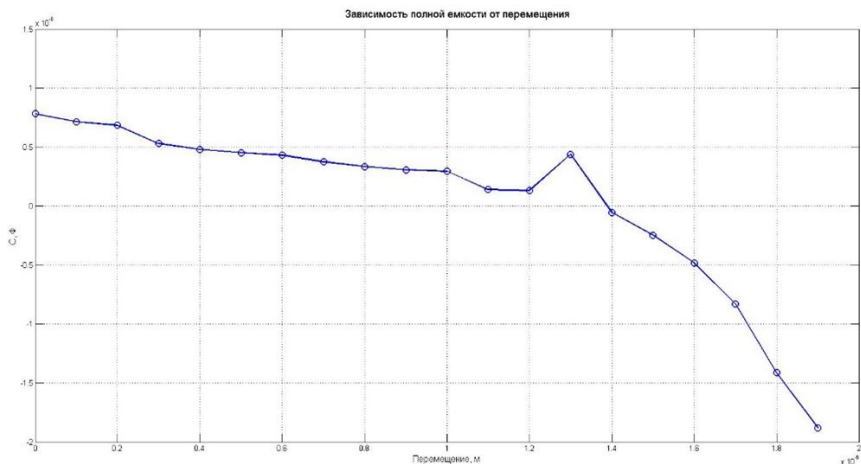


Рис. 9. График зависимости емкости переключателя с учетом перфорации от перемещения металлической мембраны

Выражение для определения емкости включает в себя эффект поля окантовки за счет кромок, а также перфорацию. Поле окантовки увеличивает приложенное усилие и, следовательно, уменьшает время переключения. Увеличения количества перфорированных отверстий подразумевает повышение эффекта абберации и, следовательно, более высокое значение емкости.

**Вывод.** В представленной работе был произведен расчет перемещения и полной емкости металлической мембраны разрабатываемого параллельного емкостного ВЧ МЭМС-переключателя. Обобщена и унифицирована аналитическая модель с использованием модели расчета емкости для перфорированного МЭМС-переключателя учитывающей емкость от неперфорированной мембраны, включая окантовочное поле, емкость из-за отверстий без окантовочного поля и емкость окантовочного поля отверстий.

Следующим этапом работы является изучение радиочастотных и электромагнитных характеристик ВЧ МЭМС-переключателя. Кроме того, для того, чтобы улучшить время переключения возможно увеличить количество меандров и количество отверстий до определенного допустимого предела, а также выбор материала металлической мембраны более низкой плотности, что снизит жесткость без ущерба для стабильности, что необходимо при разработке высокопроизводительных ВЧ МЭМС-переключателей.



Результаты получены с использованием оборудования студенческого конструкторского бюро «Элементы и приборы инерциальных навигационных систем робототехники» Института нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального университета (г. Таганрог) при финансовой поддержке «Программы развития Южного федерального университета до 2021 года» проект ВнГр -07/2017-10.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Goldsmith C.L., Yao Z., Eshelman S., and Denniston D.* Performance of loss-loss RF MEMS capacitive switches // IEEE Microwave and Guided Wave Letters. – August 1998. – Vol. 8, No. 8. – P. 269-271.
2. *Goldsmith C., Randall J., Eshelman S., Lin T.H., Denniston D., Chen S., and Norvell B.* Characteristics of micromachined switches at microwave frequencies // in 1996 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig. San Francisco, CA, June 1996. – P. 1141-1144.
3. *Yao J.J. and Chang M.F.* A surface micromachined miniatureswitch for telecommunications applications with signal frequencies from DC up to 4 GHz // in Int. Conf. On Solid-State Sensors and Actuators Dig., Stockholm, Sweden, June 1996. – P. 384-387.
4. *Barker N.S. and Rebeiz G.M.* Distributed MEMS true-time delay phase shifters and wideband switches // IEEE Trans. On Microwave Theory and Techniques. – Nov. 1998. – Vol. 46, No. 11. – P. 1881-1890.
5. *Gabriel M. Rebeiz.* RF MEMS: Theory, Design, and Technology. John Wiley & Sons, Inc. ISBN: 0471-20169-3.
6. *Ananthasuresh G.K., Vinoy K.J., Gopalakrishnan S., Bhat K.N. and Aatre V.K.* Micro and Smart Systems, Wiley, India, 2010.
7. *Palmer H.B.* Capacitance of a parallel-plate capacitor by the Schwartz-Christoffel transformation // Trans. AIEE. – March 1927. – Vol. 56. – P. 363.
8. *Poonam Verma, Surjeet Singh.* Design and Simulation of RF MEMS Capacitive type Shunt Switch & its Major Applications // in IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering (IOSR JECE), January – February 2013.
9. *Yasser Mafinejad, Majid Zarghami, Abbas Z. Kouzani, Khalil Mafinezhad.* Design and simulation of a high isolation RF MEMS shunt capacitive switch for C-K band // IEICE Electronics Express. – Vol. 10, No. 24. – P. 1-8.
10. *Ameen H. El-Sinawi, Maher Bakri-Kassem, Taha Landols, Omar Awad.* A novel comprehensive approach to feedback control of membrane displacement in radio frequency microelectromechanical switches // journal homepage: [www.elsevier.com/locate/sna](http://www.elsevier.com/locate/sna).
11. *Vladimir L. Rabinovich, Raj K. Gupta, and Stephen D. Senturia.* The Effect of Release-Etch Holes on the Electromechanical Behavior of MEMS Structures // 1997 International Conference on Solid-state Sensors and Actuators, TRANSDUCERS '97, Chicago, June 16-19, 1997.
12. *El-Asmar M., Hariri Y., Domingue F., Nerguizian V.* Improving the time response of mems switches for rf applications. 1-4244-0038-4 2006, IEEE CCECE/CCGEI, Ottawa, May 2006.
13. *Browne J.* Switches perform high-frequency signal routing // Microwaves and RE (July). – 1989. – P. 125-132.
14. *Brown E.R.* RF-MEMS switches for reconfigurable integrated circuits // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1998. – 46 (11). – P. 1868-1880.
15. *Campbell T.* MEMS switch technology approaches the ideal switch // Journal of Applied Microwave and Wireless. – 2001. – 13 (5). – P. 100-107.
16. *Pacheco S.P., Katehi L.P.B., Nguyen C.T.-C.* Design of low actuation voltage RF MEMS switch // in Proceeding of 2000 IEEE MTT-S, IEEE, Piscataway, NJ, USA. – 2000. – P. 165-168.
17. *Park J.Y., Kim G.H., Chung K.W., Bu J.U.* Electroplated RF MEMS capacitive switches // in Proceeding of IEEE International Conference on MEMS, MEMS 2000, IEEE, Piscataway, NJ, USA. – 2000. – P. 639-644.
18. *Stefanini R., Chatras M., Blondy P.* Member, IEEE and G. M. Rebeiz, Fellow, Miniature MEMS Switches for RF Application // Journal of Microelectromechanical Systems. – December 2011. – Vol. 20, No. 6. – P. 1324-1335.
19. *Rebeiz G.M., Muldavin J.B.* RF MEMS Switches and Switch Circuits // IEEE Microwave Magazine. – 2001. – Vol. 2, No. 4. – P. 59-71.

20. *Randy J. Richards, Héctor J. De Los Santos* MEMS-for RF/microwave wireless applications: the next wave – Part 2. *Microwave journal*, March 2001, Horizon House Publications, Inc.
21. *Goldsmith C., Lin T-H., Powers B., Wu W-R. and Norvell B.* Micromechanical membrane switches for microwave applications, *Tech. Digest, IEEE Microwave Theory and Techniques Symp.* – 1995. – P. 91-95.
22. *Goldsmith C., Ehmke J., Malczewski A., Pillans B., Eshelman S., Yao Z., Brank J., and Eberly M.* "Lifetime Characterization Of Capacitive RF MEMS Switches // 2001 IEEE International Microwave Symposium. – May 2001. – Vol. 1. – P. 227-230,

## REFERENCES

1. *Goldsmith C.L., Yao Z., Eshelman S., and Denniston D.* Performance of loss-loss RF MEMS capacitive switches, *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, August 1998, Vol. 8, No. 8, pp. 269-271.
2. *Goldsmith C., Randall J., Eshelman S., Lin T.H., Denniston D., Chen S., and Norvell B.* Characteristics of micromachined switches at microwave frequencies, in *1996 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig. San Francisco, CA, June 1996*, pp. 1141-1144.
3. *Yao J.J. and Chang M.F.* A surface micromachined miniatureswitch for telecommunications applications with signal frequencies from DC up to 4 GHz, in *Int. Conf. On Solid-State Sensors and Actuators Dig., Stockholm, Sweden, June 1996*, pp. 384-387.
4. *Barker N.S. and Rebeiz G.M.* Distributed MEMS true-time delay phase shifters and wideband switches, *IEEE Trans. On Microwave Theory and Techniques*, Nov. 1998, Vol. 46, No. 11, pp. 1881-1890.
5. *Gabriel M. Rebeiz.* RF MEMS: Theory, Design, and Technology. John Wiley & Sons, Inc. ISBN: 0471-20169-3.
6. *Ananthasuresh G.K., Vinoy K.J., Gopalakrishnan S., Bhat K.N. and Aatre V.K.* Micro and Smart Systems, Wiley, India, 2010.
7. *Palmer H.B.* Capacitance of a parallel-plate capacitor by the Schwartz-Christoffel transformation, *Trans. AIEE*, March 1927, Vol. 56, pp. 363.
8. *Poonam Verma, Surjeet Singh.* Design and Simulation of RF MEMS Capacitive type Shunt Switch & its Major Applications, in *IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering (IOSR JECE)*, January – February 2013.
9. *Yasser Mafinejad, Majid Zarghami, Abbas Z. Kouzani, Khalil Mafinezhad.* Design and simulation of a high isolation RF MEMS shunt capacitive switch for C-K band, *IEICE Electronics Express*, Vol. 10, No. 24, pp. 1-8.
10. *Ameen H. El-Sinawi, Maher Bakri-Kassem, Taha Landols, Omar Awad.* A novel comprehensive approach to feedback control of membrane displacement in radio frequency micro-electromechanical switches, *journal homepage: www.elsevier.com/locate/sna*.
11. *Vladimir L. Rabinovich, Raj K. Gupta, and Stephen D. Senturia.* The Effect of Release-Etch Holes on the Electromechanical Behavior of MEMS Structures, *1997 International Conference on Solid-state Sensors and Actuators, TRANSDUCERS '97, Chicago, June 16-19, 1997*.
12. *El-Asmar M., Hariri Y., Domingue F., Nerguizian V.* Improving the time response of mems switches for rf applications. 1-4244-0038-4 2006, IEEE CCECE/CCGEL, Ottawa, May 2006.
13. *Browne J.* Switches perform high-frequency signal routing, *Microwaves and RE (July)*, 1989, pp. 125-132.
14. *Brown E.R.* RF-MEMS switches for reconfigurable integrated circuits, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1998, 46 (11), pp. 1868-1880.
15. *Campbell T.* MEMS switch technology approaches the ideal switch, *Journal of Applied Microwave and Wireless*, 2001, 13 (5), pp. 100-107.
16. *Pacheco S.P., Katehi L.P.B., Nguyen C.T.-C.* Design of low actuation voltage RF MEMS switch, in *Proceeding of 2000 IEEE MTT-S, IEEE, Piscataway, NJ, USA, 2000*, pp. 165-168.
17. *Park J.Y., Kim G.H., Chung K.W., Bu J.U.* Electroplated RF MEMS capacitive switches, in *Proceeding of IEEE International Conference on MEMS, MEMS 2000, IEEE, Piscataway, NJ, USA, 2000*, pp. 639-644.
18. *Stefanini R., Chatras M., Blondy P.* Member, IEEE and G. M. Rebeiz, Fellow, Miniature MEMS Switches for RF Application, *Journal of Microelectromechanical Systems*, December 2011, Vol. 20, No. 6, pp. 1324-1335.

19. *Rebeiz G.M., Muldavin J.B.* RF MEMS Switches and Switch Circuits, *IEEE Microwave Magazine*, 2001, Vol. 2, No. 4, pp. 59-71.
20. *Randy J. Richards, Héctor J. De Los Santos* MEMS-for RF/microwave wireless applications: the next wave – Part 2. *Microwave journal*, March 2001, Horizon House Publications, Inc.
21. *Goldsmith C., Lin T-H., Powers B., Wu W-R. and Norvell B.* Micromechanical membrane switches for microwave applications, *Tech. Digest, IEEE Microwave Theory and Techniques Symp.*, 1995. pp. 91-95.
22. *Goldsmith C., Ehmke J., Malczewski A., Pillans B., Eshelman S., Yao Z., Brank J., and Eberly M.* "Lifetime Characterization Of Capacitive RF MEMS Switches, *2001 IEEE International Microwave Symposium*, May 2001, Vol. 1, pp. 227-230,

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Е.А. Рындин.

**Лысенко Игорь Евгеньевич** – Южный федеральный университет; e-mail: ielysenko@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +78634371603, кафедра конструирования электронных средств; зав. кафедрой; д.т.н.; доцент.

**Ткаченко Алексей Вячеславович** – e-mail: msqk@mail.ru; тел.: +79286059722; кафедра конструирования электронных средств; аспирант.

**Lysenko Igor Evgenievich** – Southern Federal University; e-mail: ielysenko@sfedu.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371603; the department of electronic apparatuses design; head of department; dr. of eng. sc.; associate professor.

**Tkachenko Alexey Vyacheslavovich** – e-mail: msqk@mail.ru; phone: +79286059722; the department of electronic apparatuses design; graduate student.

УДК 539.23

DOI 10.23683/2311-3103-2018-2-16-25

**Ю.В. Клунникова, Е.Ю. Гусев**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОУПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПЛЕНКАХ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ НА ПОДЛОЖКЕ САПФИРА, ПОЛУЧЕННЫХ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИМ ОСАЖДЕНИЕМ**

*Представлены результаты экспериментальных исследований применения метода плазмохимического осаждения из газовой фазы для получения пленок поликристаллического кремния на сапфировой подложке, которая является основой для производства радиационно-стойких интегральных схем. Полученные образцы исследовались методами стилусной профилометрии и атомно-силовой микроскопии. Выявлен ряд параметров, влияющих на фазу, значения размеров кристаллов и среднеквадратическое значение шероховатости полученных пленок. Установлены режимы плазмохимического осаждения, обеспечивающие получение однородных пленок поликристаллического кремния с размером кристаллитов до 250 нм. Средняя шероховатость поверхности составляет  $16,2 \pm 2,1$  нм. При температурах осаждения порядка 700 °С сводится к минимуму влияние различий в коэффициентах теплового расширения кремния и сапфира и сокращается плотность дефектов в полученных пленках. Плазмохимическое осаждение пленки поликристаллического кремния на подложку сапфира сопровождается появлением термоупругих напряжений, которые могут вызвать разрушение пленочного покрытия и поверхностного слоя подложки. Проведена оценка уровня термоупругих напряжений в поликристаллических пленках кремния на сапфировой подложке от параметров плазмохимического осаждения, толщины пленки, свойств пленки и подложки в программе ANSYS, использующей метод контрольных элементов. Определено, что величина термоупругих напряжений в структуре пленка поликристаллического кремния–сапфировая подложка пропорциональна температуре осаждения. Увеличение термоупругих напряжений при увеличении температуры осаждения связано с возрастанием влияния различия температурных коэффициентов линейного расширения*