

Аналіз типів МЕМС перемикачів, їх переваги та недоліки

Захарова Карина¹, Владислав Євсєєв²

1. Кафедра КІТАМ, Харківський національний університет радіоелектроніки, УКРАЇНА,
Харків, пр. Науки 14, email: karina.zakharova97@gmail.com

2. Кафедра КІТАМ, Харківський національний університет радіоелектроніки, УКРАЇНА,
Харків, пр. Науки 14, email: vladyslav.yevsieiv@nure.ua

Анотація: В даному матеріалі представлені типи МЕМС перемикачів, їх конструкції, використовувани матеріали, параметри, принцип роботи. Виявлено їх переваги і недоліки. Проведено аналіз відмов МЕМС перемикачів.

Ключові слова: МЕМС, електростатичні МЕМС, п'єзоелектричні МЕМС перемикачі, високочастотні МЕМС, резистивні перемикачі, ємнісні перемикачі.

I. ВСТУП

В останнє десятиліття прилади МЕМС зазнали величезний розвиток в різних галузях інформаційних і комунікаційних технологій. Особливо недавні тенденції до взаємодії між компонентами інтегральних мікросхем і зовнішнім середовищем підштовхнули до розробки інноваційних пристроїв і технологій, здатних зв'язувати електричні властивості з декількома різними фізичними областями. Зокрема, МЕМС пристрої використовують мініатюрну рухливу структуру, рух або положення якої може взаємодіяти з електростатичними, тепловими, магнітними, рідинними, електромагнітними сигналами.

II. ТЕХНОЛОГІЇ МЕМС

Мікроелектромеханічні системи – одна з найбільш передових технологій, що дозволяє не тільки покращити характеристики електронної апаратури, але і створювати інноваційні пристрої для вирішення завдань в абсолютно нових областях.

МЕМС пристрої складні машини, які дозволяють чіпам функціонувати механічно, вони діють як найбільш прямі зв'язки між цифрової електронікою і фізичним світом. МЕМС мають чотири основних компоненти. Це мікроелектроніка, мікродатчик, мікроактюатори і мікроструктури.

Мікроелектроніка діє як мозок і контролює всі дані. Електроніка отримує дані і обробляє їх, після чого приймаються відповідні рішення. Електроніка отримує дані від різних мікросенсорів.

Мікросенсори діють як руки, ноги і очі МЕМС. Вони виявляють інформацію з навколишнього середовища і передають її на мікроелектроніку для обробки. Ці датчики можуть контролювати механічні, термічні, біологічні, хімічні, оптичні та магнітні свідчення з навколишнього середовища.

Мікроактюатор діє як перемикач або тригер для активації зовнішнього пристрою. Спершу

мікросенсори отримують дані й обробляють їх, далі мікроактюатор передає дані на мікроелектроніку для прийняття рішень. На підставі цього рішення мікроактюатор активує або деактивує пристрій.

Мікроструктури діють як клапани, контролюючи потік речовини або як дуже маленькі фільтри. З поліпшеннями в технології мікрообробки, можна побудувати надзвичайно маленькі структури, відомі як мікроструктури, на поверхні чипа, вбудовані прямо в МЕМС.

III. ТИПИ ПЕРЕМИКАЧЕЙ МЕМС, ЇХ ПЕРЕВАГИ ТА НЕДОЛІКИ

Існують ємнісні і резистивні високочастотні МЕМС перемикачі, що виготовляються в двох конфігураціях: паралельної і послідовною. В ємнісних перемикачах комутація високочастотного сигналу здійснюється за рахунок зміни ємності в комутованому ланцюгу. В резистивних перемикачах комутація сигналу реалізується з'єднанням та роз'єднанням металевих контактів. Ємнісні перемикачі – це комутаційні елементи для таких застосувань, як регульовані конденсатори і полоскові фільтри [2]. Більшість ємнісних перемикачів має паралельну конфігурацію (рис. 1, а).

У такій конструкції стан, при якому рухома металева мембрана знаходиться у верхньому положенні і високочастотний сигнал проходить через перемикач від входу до виходу, називається "увімкненим". Стан, коли мембрана під дією електростатичних сил, що виникають при додатку керуючого напруги між нижнім електродом і мембраною, опускається вниз і велика частина високочастотного сигналу замикається на землю, називається "вимкненим". Для ізоляції один від одного мембрани і нижнього електрода у "вимкненому стані" нижній електрод покривають тонким шаром діелектрика.

В послідовних ємнісних перемикачів стан, коли металева мембрана знаходиться у верхньому положенні і високочастотний сигнал не пропускається, називається "вимкненим" і, навпаки, стан, коли мембрана знаходиться у нижньому положенні і високочастотний сигнал пропускається, називається "увімкненим" [3].

Резистивні МЕМС перемикачі відрізняються від ємнісних тим, що у них між металевою мембраною і сигнальною лінією немає діелектрика. Комутаційний стан цих перемикачів в основному

визначається зміною резистивного контактного опору. Ця особливість вимикача дає можливість використовувати його при низьких частотах.

Рухома частина МЕМС перемикача – актуатор, який виконується у вигляді закріпленого з одного боку кантильвера (від англ. cantilever – «кронштейн», «консоль») (рис. 1, а), або закріпленої по краях мембрани (рис. 1, б).

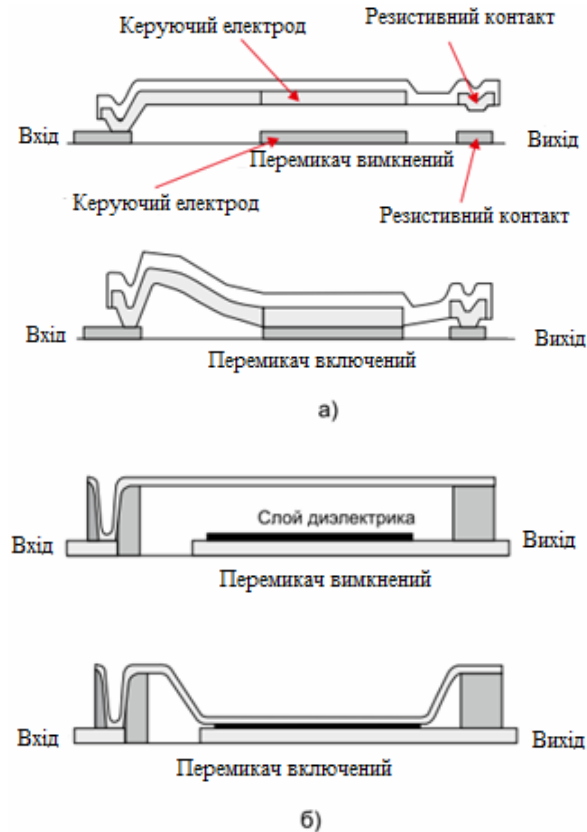


Рис. 1. МЕМС перемикачі: а) кантильвер з резистивним контактом; б) мембрана з ємнісним контактом

Привод актуатора може бути електростатичним, п'єзоелектричним, електромагнітним або термоелектричним. Найчастіше використовується електростатичний привід. У разі електростатичного приводу на актуатор і підкладці розташовуються електроди, на які подається керуюча напруга. Під його дією актуатор притягується к підкладці, що викликає спрацювання перемикача.

Електростатичні МЕМС ключі в свою чергу підрозділяються на два типи – кантильверні і мембранні [4].

Кантильверні електростатичні перемикачі складаються з двох важливих механічних елементів - тонкої балки, закріпленої на анкері ліворуч від нижнього електроду, використовуваного для подачі керуючого напруги і верхнього контактної електроду, підвішеного над розімкнутою ВЧ лінією, яку він замикає. Механізм спрацювання мікроперемикача може бути описаний рівняннями механіки для кривини балки.

При подачі напруги зміщення між верхнім і нижніми електродами відбувається перерозподіл зарядів, що приводить до появи електростатичних сил між металевими поверхнями. Ці сили змушують вільно підвішений контакт рухатися у напрямку до нижнього електроду. Оскільки кантильвер починає згинатися, в ньому виникають сили розтягування, спрямовані в протилежному напрямку відносно електростатичних сил. Як тільки напруга досягає порогового значення, тобто електростатичні сили стають більше сили пружності, балка кантильверу різко падає на нижній електрод, замикаючи при цьому ВЧ контакти. Консоль повертається в колишнє стан після того, як прикладена напруга стане нижче порогового значення розмикання, яке багато нижче напруги спрацювання.

Мембранні електростатичні МЕМС перемикачі На рис. 2 показана схема мембранного ємнісного ВЧ перемикача з омичним контактом [5].

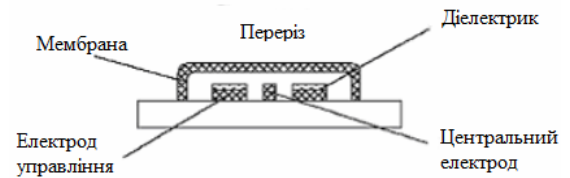


Рис. 2. Мембранний ємнісний перемикач

Ключ складається з металеві мембрани, яка управляється за рахунок електростатичної сили одним або двома ізолюваними електродами. При подачі напруги зміщення між мембраною і нижніми керуючими електродами відбувається перерозподіл зарядів, що приводить до появи електростатичних сил між металевими поверхнями.

На актуатор з п'єзоелектричним приводом наносяться керуючі електроди, розділені шаром п'єзоелектрика. Подача на них керуючої напруги викликає вигин актуатора та спрацювання перемикача. Обидва цих привода споживають невелику електричну потужність тільки в момент спрацювання і нічого не споживають у стаціонарному режимі.

Перевага п'єзоелектричного приводу полягає в тому, що реверсом керуючої напруги можна розімкнути контакти МЕМС перемикача які спрацювали під впливом мікрозварювання при перемиканні потужного сигналу. Недолік полягає в тому, що на актуатор треба наносити додаткове покриття і це ускладнює технологічний цикл та вимагає додаткового обладнання.

В основі роботи п'єзоелектричних МЕМС перемикачів лежить фізичне явище – механічне встановлення нового розміру кристала при подачі електричного напруги на його поверхню. Одна з конструкцій перемикача цього типу представлена на рис. 3 [6] – це перемикач мембранного типу. Його основні параметри:

- спрацювання при напрузі до 5 В;
- контакти притискаються з силою 1-2 мкН;
- аберації мембрани близько 3-4 мкм.

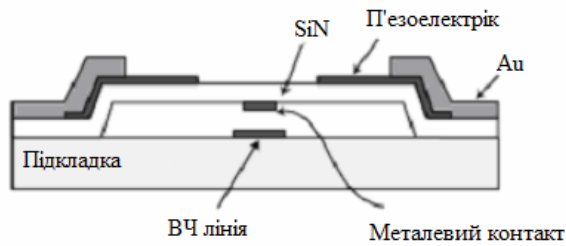


Рис. 3. П'єзоелектричний МЕМС перемикач мембранного типу

Залежність напрямку сили п'єзоелектричного шару від полярності напруги допомагає пом'якшити проблему тертя спокою при контакті метал-метал. Але враховуючи всі переваги є серйозний недолік, що обмежує поширення комутаторів на основі п'єзоелектриків – це необхідність завдавати верстви зі складним складом в процесі напилення плівки п'єзоелектриків, що вимагає додаткового обладнання, відсутнього в стандартних лінійках з виробництва мікроелектронних компонентів на основі кремнієвої технології і на з'єднаннях.

В МЕМС перемикачах з електромагнітним приводом актюатор пересувається завдяки магнітного поля, що виникає при протіканні струму через керуючий елемент перемикача. Часто таким елементом є нанесене на підкладку планарної котушки індуктивності.

Електромагнітні перемикачі працюють за принципом дії традиційних електромагнітних реле. Основна їхня перевага полягає в тому, що управління здійснюється за рахунок подачі напруги 3-10 В. Крім того, постійні магніти і електромагнітні матеріали дозволяють створити реле з функцією самоспрацювання.

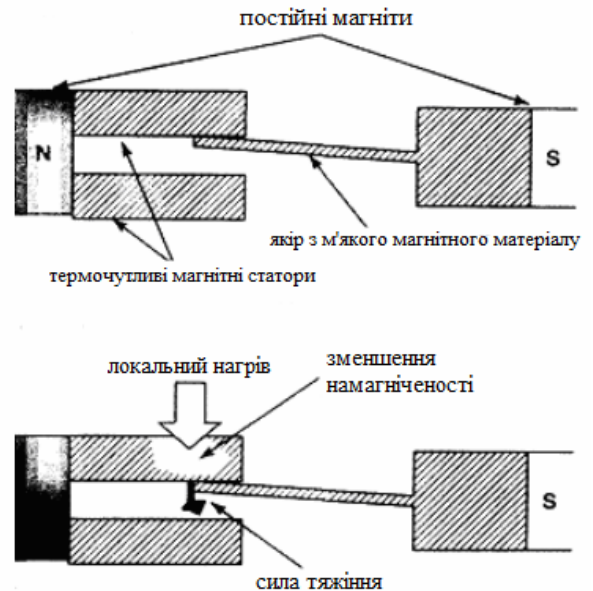
Термоелектричні приводи МЕМС перемикачів використовують як просто теплове розширення актюатору при проходженні керуючого електричного струму, або відмінність коефіцієнтів теплового розширення що входять до актюатору матеріалів. Ці типи приводов можуть створювати значні механічні зусилля на контактах МЕМС перемикача, що дозволяє перемикати сигнали більш високої потужності, але мають великий час спрацювання і споживають енергію у включеному стані. Електромагнітні та термоелектричні приводи не отримали такого широкого розповсюдження, як електростатичний і п'єзоелектричний [1].

Термомеханічні перемикачі працюють за рахунок різниці коефіцієнтів термічного розширення різних матеріалів або за рахунок зменшення намагніченості термочутливих магнітних статорів. Основна перевага даного типу ключів високе контактне усилення, але є два дуже істотних недоліка:

- найвища споживана потужність;
- найнижчий час спрацювання.

Принцип дії термічного привода ТСМА показаний на рис. 4. Привод складається з постійних магнітів, якорі, виконаного з м'якого

магнітного матеріалу, і статорів, виготовлених з термочутливих магнітних матеріалів з низькою точкою Кюрі. При нагріванні одного з статорів зменшується його намагніченість. При цьому, виникає градієнт магнітного поля, що викликає зміна сили діючої між статорами, у результаті другий статор притягує до себе якор.



а) без нагріву, б) з нагрівом

Рис. 4. Принцип дії термічного магнітного термореле

Контакти МЕМС перемикачів бувають двох видів: резистивні "метал – метал" (рис. 1, а) та ємнісні "метал – діелектрик – метал" (рис. 1, б).

Резистивні контакти характеризуються опором у відкритому стані $R_{\text{вкл}}$, яке зазвичай становить частки ома, і ємністю в закритому стані $C_{\text{викл}}$, типове значення, що відповідає одиниці фемтофарад.

Перемикач з ємнісними контактами являє собою дискретно перебудовується конденсатор, причому відношення ємностей у включеному і вимкненому стані $C_{\text{вкл}}/C_{\text{викл}}$ може досягати 100. Ці перемикачі мають дуже малі втрати на високих частотах (0,1 дБ на 40 ГГц) і високу лінійність (понад 66 дБм). Їх керуюче напруження може бути знижено, оскільки немає необхідності у великому притисковому зусиллі актюатора для забезпечення низького опору контакту. Контактні поверхні повинні бути гладкими, тому що можливі зазори між ними значно знижують ставлення ємностей $C_{\text{вкл}}/C_{\text{викл}}$.

До переваг МЕМС перемикачів належать:

- надзвичайно низький струм в робочій точці (менше 10 нА);
- високий рівень ізоляції;
- дуже мале енергоспоживання (МЕМС перемикачі з електростатичним або п'єзоелектричним чи не стоїть хтось споживають енергію 10-100 нДж при спрацюванні і не споживають у стаціонарному режимі);
- висока радіаційна стійкість;
- низька вартість за умови масового виробництва.

Разом з тим МЕМС перемикачі мають ряд недоліків, таких як висока керуюче напруження (від 30 до 100 В), відносно велика час спрацювання (зазвичай до 100 мкс) і низький ресурс, в значній мірі що залежить від переключити потужності.

IV. ХАРАКТЕРНІ ПРИЧИНИ ВІДМОВИ МЕМС ПЕРЕМИКАЧІВ

Для ємнісного типу контакту при низьких потужностях (1 мВт і нижче) основний механізм відмови – зарядка діелектрика. Вирішенням даної проблеми є підвищення якості діелектрика і використання напруги спрацювання зі змінною полярністю.

Для перемикачів середньої потужності (10-100 мВт) основні механізми відмови - зарядка діелектрика і вихід з ладу через високої щільності струму. Проблема високої щільності струму зазвичай вирішується збільшенням товщини металеві мембрани і її кріплення.

Для перемикачів високої потужності (понад 100 мВт) основні механізми відмови – мимовільне спрацювання і висока щільність струму. Мимовільне спрацювання перемикача виникає при напрузі в ВЧ електроді, порівнянному з напругою спрацювання або відпускання, отже, рішенням цієї проблеми буде збільшення жорсткості структури перемикача та (або) керування за допомогою електродів окремих від ВЧ електрода.

Для омічного контакту при низьких потужностях (менше 1 мВт) Основними механізмами відмови є ерозія, зміцнення контактів і освіта діелектричних плівок на контакті. Рішення цієї проблеми полягає в підборі металів з кращими характеристиками контакту.

Перемикачі середньої потужності (10-100 мВт) виходять з ладу через високої щільності струму в контакті і перенесення матеріалу між контактами; ця проблема вирішується підбором металів з кращими характеристиками контакту і великим зусиллям контакту.

Для потужних перемикачів (від 100 мВт і вище) основним механізми відмови є підвищення температури, щільності струму і перенесення матеріалу в контакті. Ця проблема вирішується проведенням роботи з охолодження контактної площадки, збільшенням притискає сили контактів і добором матеріалу, з якого зроблені контакти [7].

V. ВИСНОВКИ

Розглянуто причини відмов ємнісних конструкції МЕМС перемикачів, основні матеріали контактів. Виходячи з результатів аналізу, виявлено, що проблемою залишається схильність

до залипання і необхідність герметизації МЕМС перемикачів.

Для виготовлення потужних ВЧ перемикачів (від 100 мВт і вище) найбільш підходящим типом контакту є омічний контакт. Це викликано необхідністю застосування мембран з жорстким кріпленням для ємнісного типу контакту через ефектів мимовільного спрацювання і високої щільності струму, що нівелює їх переваги перед перемикачами з омічним типом контакту.

Для виготовлення перемикачів середньої і малої потужності (до 100 мВт), інструмент перемикачів з ємнісним типом контакту має важливе перевага - можливість виготовлення перемикача з низьким напругою спрацювання, що дозволяє використовувати єдиний ланцюг живлення як для напівпровідникових приладів, так і для управління перемикачами.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] Sugesh M. S, Nataraj B. Design and Modeling of RF MEMS Phase Shifters Using Various Structures of Coplanar Waveguides//International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). Vol. 2. Issue 3. 2015. June.
- [2] John H. Lau. Advanced MEMS Packaging / [H. Lau John, Lee Chengkuo, C. S. Prema-chandran, Yu Aibin]. — 2009. — P. 475—485.
- [3] Белов Л. Переключатели сверхвысоких сигналов. — М.: Электроника: Наука, Технология, Бизнес. — 2006. — № 1. — С. 20—25.
- [4] Bortnikova, V., Yevsieiev, V., Maksymova, S., Nevludov, I., Chala, O., & Kolesnyk, K. (2019). Mathematical model of equivalent stress value dependence from displacement of RF MEMS membrane. Paper presented at the 2019 IEEE 15th International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design, MEMSTECH 2019 - Proceedings, 83-86. doi:10.1109/MEMSTECH.2019.8817394
- [5] Соловьев Ю. В., Волков В. В., Александров С. Е., Спешилова А. Б. МЭМС-переключатель резистивно-емкостного типа Нано- и микросистемная техника №7(84) 2007 год стр.65.
- [6] Переключатели сверхвысокочастотных сигналов/ Белов Л. - Электроника: Наука, Технология, Бизнес. №1/2006 М.: Техносфера, 2006. – с. 20-25.
- [7] П.П. Мальцев, А.Ю. Павлов, Н.В. Щаврук. Электростатический СВЧ МЭМС коммутатор сигналов для частотного диапазона 10-12 ГГц на подложке GaAs. // Радиопромышленность 2012 вып.3 - С 142-148.