

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Конструкції і технології створення МЕМС ВЧ комутаторів
(тема)

Виконав:

студент 4 курсу, групи МНТМН-21-1
Редькін Є.О.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 153 «Мікро та наносистемна
техніка»

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма «Мікро та нанoeлектроніка»
(повна назва освітньої програми)

Керівник ст. викл. МЕЕПП Бендеберя Г. М.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

(підпис)

Бондаренко І.М.
(прізвище, ініціали)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Спеціальність 153 «Мікро та наносистемна техніка»
(код і повна назва)
Тип програми освітньо-професійна
Освітня програма «Мікро та наноелектроніка»
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

« ____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Редькіну Єгору Олеговичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Конструкції і технології створення MEMC ВЧ комутаторів

затверджена наказом університету від 26 травня 2025 р. № 414Ст.

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 16 червня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи 1. Конструктивні рішення основних типів ВЧ MEMC перемикачів 2. Технології що забезпечують створення структур 3. Технічні параметри і методики тестування ВЧ MEMC перемикачів.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

1. Конструктивні рішення основних типів ВЧ MEMC перемикачів ; .

2. Технології що забезпечують створення структур

3. Технічні параметри і методики тестування ВЧ MEMC перемикачів.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри)

1. Презентація – 12 слайдів.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технічного завдання	26.05.2025	
2	Огляд конструкцій і технологій МЕМС ключів	27.06.2025	
3	Дослідження досягнутих технічних характеристик	30.05.2025	
4	Дослідження методів тестування параметрів комутаторів	03.06.2025	
5	Оформлення пояснювальної записки	06.06.2025	7
6	Рецензування, нормоконтроль	09.06.2025	
7	Захист роботи	16.06.2025	

Дата видачі завдання 26 травня 2025 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____ ст. викладач Бендеберя Г.М. _____
(підпис) (посада, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 38 сторінок, 23 рисунків, 14 джерел посилання, 2 додатки.

MEMS, ПЕРЕМИКАЧИ, КОНСТРУКЦІЯ, ТЕХНОЛОГІЯ, ВЧ ПАРАМЕТРИ, МЕТОДИКА ТЕСТУВАННЯ

Мета роботи – дослідження розвитку конструктивних и технологічних рішень щодо створення ВЧ MEMS перемикачів в галузі мікро- і наноелектроніки, та методів випробування їх технічних параметрів

Об'єкт дослідження – конструкції, технології створення і методика тестування ВЧ MEMS перемикачів

Метод дослідження – аналіз літературних джерел та інтернет ресурсів.

Актуальність роботи пов'язана з активним впровадженням ВЧ MEMS перемикачів у приладобудуванні вимірювального і аналітичного обладнання, в новітніх мікроелектронних приладах обробки сигналів НВЧ діапазону, сучасних системах радіолокації.

В представленій роботі зроблено огляд основних конструктивних рішень щодо удосконалення характеристик ВЧ MEMS комутаторів при застосуванні досягнень сучасної технології і використанні нових матеріалів. Особлива увага приділена можливості зниження керуючої комутацією рівня напруги. В роботі наведені також основні параметри що характеризують якість комутації в кожному з конструктивних рішень та фактори, що призводять до їх погіршення; представлена також методика їх вимірювання.

Результати роботи можуть бути використані у навчальному процесі.

ABSTRACT

Explanatory note of the qualification work: 38 pages, 23 figures, 14 references, 2 appendices.

MEMS, SWITCHES, DESIGN, TECHNOLOGY, HF PARAMETERS, TESTING METHODOLOGY

The purpose of the work is to study the development of constructive and technological solutions for the creation of HF MEMS switches in the field of micro- and nanoelectronics, and methods for testing their technical parameters

The object of research is designs, creation technologies and testing methods of HF MEMS switches

The research method is the analysis of literary sources and Internet resources.

The relevance of the work is associated with the active implementation of HF MEMS switches in instrument-making of measuring and analytical equipment, in the latest microelectronic devices for processing microwave signals, and in modern radar systems.

The presented work reviews the main design solutions for improving the characteristics of the HF MEMS switches using the achievements of modern technology and the use of new materials. Particular attention is paid to the possibility of reducing the control switching voltage level. The paper also presents the main parameters that characterize the quality of switching in each of the design solutions and the factors that lead to their deterioration; the methodology for their measurement is also presented.

The results of the work can be used in the educational process.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	7
ВСТУП.....	8
1. КОНСТРУКЦІЇ, ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ТА ПАРАМЕТРИ ВЧ MEMS КОМУТАТОРІВ.....	10
1.1 Конструктивні та технологічні особливості комутаторів MEMS на основі структур з підвісами з парилену-С.....	10
1.2 ВЧ MEMS перемикач з перфорованою мембраною.....	12
1.3 ВЧ MEMS перемикач з п'єзоелектричним актуатором.....	16
1.4 MEMS комутатор з торсіонним кріпленням.....	19
1.5 ВЧ MEMS перемикач зі спіралеподібним підвісом.....	23
1.6 Порівняння параметрів MEMS комутаторів різних конструкцій.....	26
2. КОНТРОЛЬ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ВЧ MEMS КЛЮЧІВ.....	29
2.1 Фактори, що впливають на стабільність характеристик MEMS ключів.....	29
2.2 Методики тестування параметрів MEMS перемикачів.....	30
ВИСНОВКИ.....	34
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	35
ДОДАТОК А Відомість кваліфікаційної роботи бакалавра.....	38
ДОДАТОК Б Ілюстрації.....	39

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

CVD – хімічне осадження з парової фази;

MEMS – мікро електро-механічні системи;

PECVD - хімічне осадження з парової фази, активоване плазмою;

ВЧ – високочастотний;

ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач.

ВСТУП

У сучасних електронних схемах передачі та обробки сигналів ВЧ MEMS комутатори застосовуються як складові елементи при виготовленні більш складних систем. До таких систем можна віднести матричні перемикачі, лінії затримки, підсилювачі ВЧ потужності, фазообертачі, пристрої для узгодження опору. Впровадження ВЧ MEMS технологій у виробництво таких систем дозволило покращити їх параметри та розширити функціональні можливості. Сучасні MEMS перемикачі діють на частотах до 60 ГГц і досягли наступних параметрів: час вмикання не перевищує 10 мкс, час вимикання не більше 2 мкс, робочий температурний діапазон від -40 до 85 °С. Частотні характеристики у всьому робочому діапазоні: втрати, що вносяться, не перевищують 0,1 дБ, ізоляція до -47 дБ, а втрати на відбиття вище -27 дБ. Однак такі високі параметри досягаються ціною достатньо високих керуючих комутацією напруги - кілька десятків вольт. Це обмежує можливість інтегрування MEMS комутаторів у схеми інтегральної мікроелектроніки, де напруга живлення становить величину в кілька вольт. Тенденції розвитку конструкцій та технології створення спрямовані на зниження рівня керуючих сигналів при можливому збереженні інших параметрів, що характеризують якість комутації. Слід зауважити, що хоча вища керуюча напруга дає можливість управляти сигналами більшої амплітуди і підвищити ізоляцію розімкнутого контакту, це вимагає використання DC-DC конвертерів для узгодження напруги MEMS ключа з напругою живлення інших елементів інтегральної схеми. Це ускладнює процес виготовлення та збільшує габарит ВЧ систем.

Отже, розглянуті нижче технологічні і конструктивні рішення спрямовані саме на вирішення цього завдання зниження рівня керуючих процесом комутації сигналів при не істотному зниженні інших параметрів, які характеризують якість ВЧ комутації: частотний діапазон час перемикавання, внесені втрати, втрати на відбиття, рівень ізоляції вхідного сигналу при розімкнених контактах.

1 КОНСТРУКЦІЇ, ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ТА ПАРАМЕТРИ ВЧ MEMS КОМУТАТОРІВ

1.1 Конструктивні та технологічні особливості комутаторів MEMS на основі структур з підвісами з парилену-С

Зображене на рис. 1.1 пристрій складається з рухомої платформи, трьох пар мембранних ємнісних мікроактюаторів, трьох пар сполучних пружин та двох підвісів для платформи (рис. 1.2).

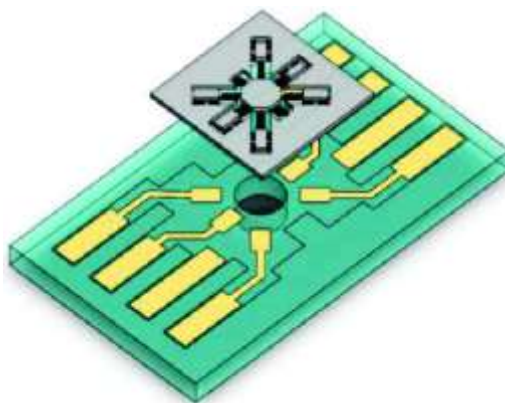


Рисунок 1.1 – Схематичне зображення трибітного ЦАП [2]

Як показано, кожен актюатор має чотири підвіси. Два актюатори, розташовані один навпроти іншого, реалізують один біт. Якщо біт є "0", то актюатори вимкнені. Якщо біт відповідає «1», актюатори замикаються на шар нижче контактної металізації водночас опускається рухома платформа. Шар парилена-С, нанесений на нижній електрод, призначений для запобігання безпосередньому контакту двох електродів контакту. Представлений комутатор виготовлений на основі підкладки кремнієвої. Однак через суттєву жорсткість цього матеріалу (значення модуля Юнга становить 130 ГПа) необхідна досить велика напруга включення при комутації, яка може доходити до 40 В і навіть вище. Для зниження напруги запропоновано використовувати еластичніший

матеріал – парилен-С (модуль Юнга становить величину 4 ГПа). Він використовується для створення підвісів актюаторів та сполучних пружин. В результаті знижується коефіцієнт пружності всієї конструкції, а це в свою чергу дозволяє зменшити напругу, що керує.

На рисунках 1.3, а б представлені зображення актюатора і фотографія чіпа на кремнієвій пластині відповідно.

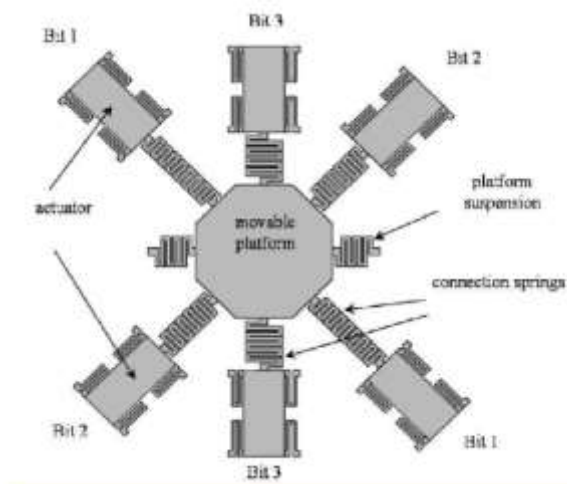
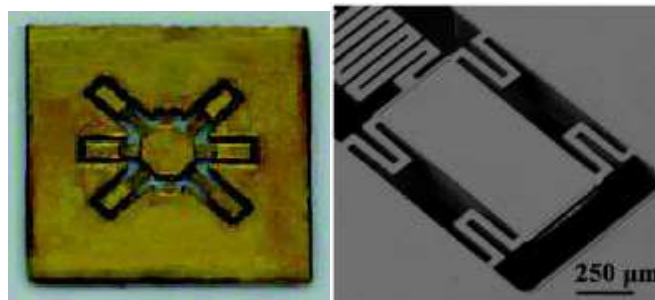


Рисунок 1.2 - ЦАП, вид зверху [2]



а

б

а - зображення актюатора ЦАП, б - Фотографії пластини з рухомою платформою та актюаторами

Рисунок 1.3 – MEMS ЦАП [2]

Технологічний процес виготовлення наведеного вище комутатора полягає в наступному. На першому етапі, використовуючи плазмове травлення,

формууюються межі рухомої платформи і актюаторів. Глибина видалених ділянок складала 150 мкм, ширина – 20 мкм. На другому етапі наносився шар парилена-С завтовшки 10 мкм. Далі були нанесені шари хрому и золота завтовшки 20 нм і 160 нм відповідно методом CVD. Для маскуваннн парилена-С проводилося ізотропне травлення кремнієвої підкладки.

На рисунку 1.4 представлена залежність величини зазору між електродами від величини прикладеної між контактами напруги

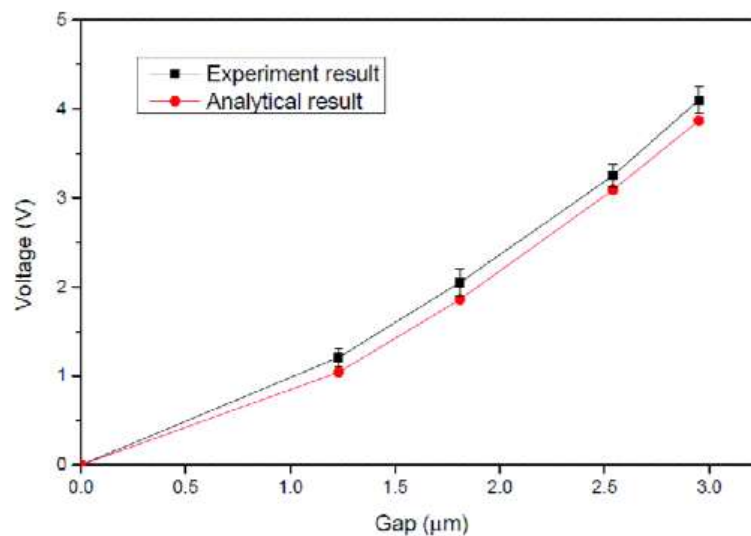


Рисунок 1.4 - Залежність зазору від прикладеної напруги: досліджена залежність - чорна лінія; розрахункова залежність – червона лінія [2]

Керуюча напруга MEMS ЦАП становила 6 В. Однак наведена конструкція перемикача має суттєвий недолік - надто тривалий час перемикання. Щоб стався надійний контакт актюатора з нижнім електродом, необхідні приблизно 100 мс. Час вимкнення становить 300 мс і фіксується після того, як електрод повернеться у своє вихідне положення.

1.2 ВЧ MEMS перемикач з перфорованою мембраною

У роботі [3] представлена розробка та технологічний процес виготовлення ВЧ MEMS перемикача з низькою напругою включення та відмінною ізоляцією

сигналу при розімкнених контактах. Зображення його конструкції представлено на рис. 1.5. Розташування різних елементів конструкції показано на рис. 1.6

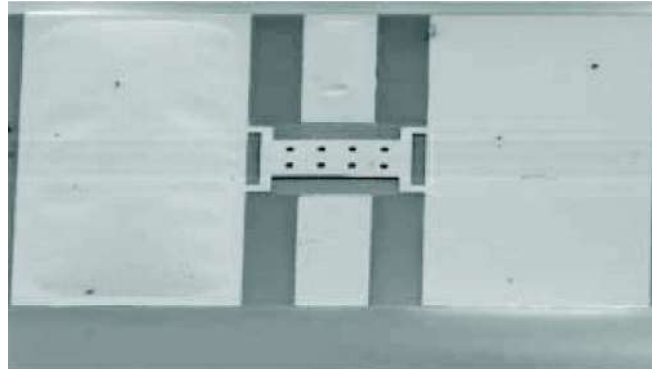


Рисунок 1.5 – Зображення ємнісного ВЧ MEMS ключа [3]

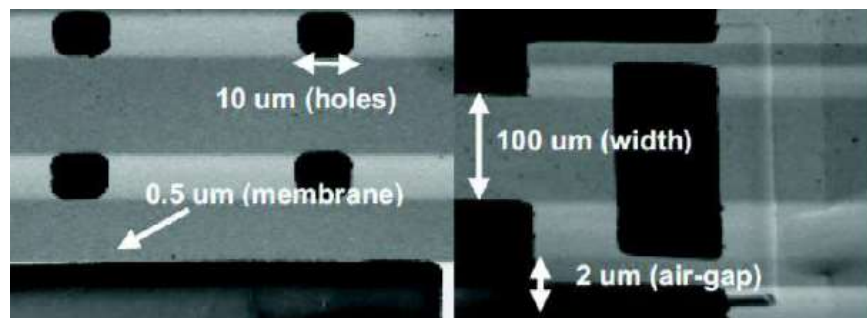
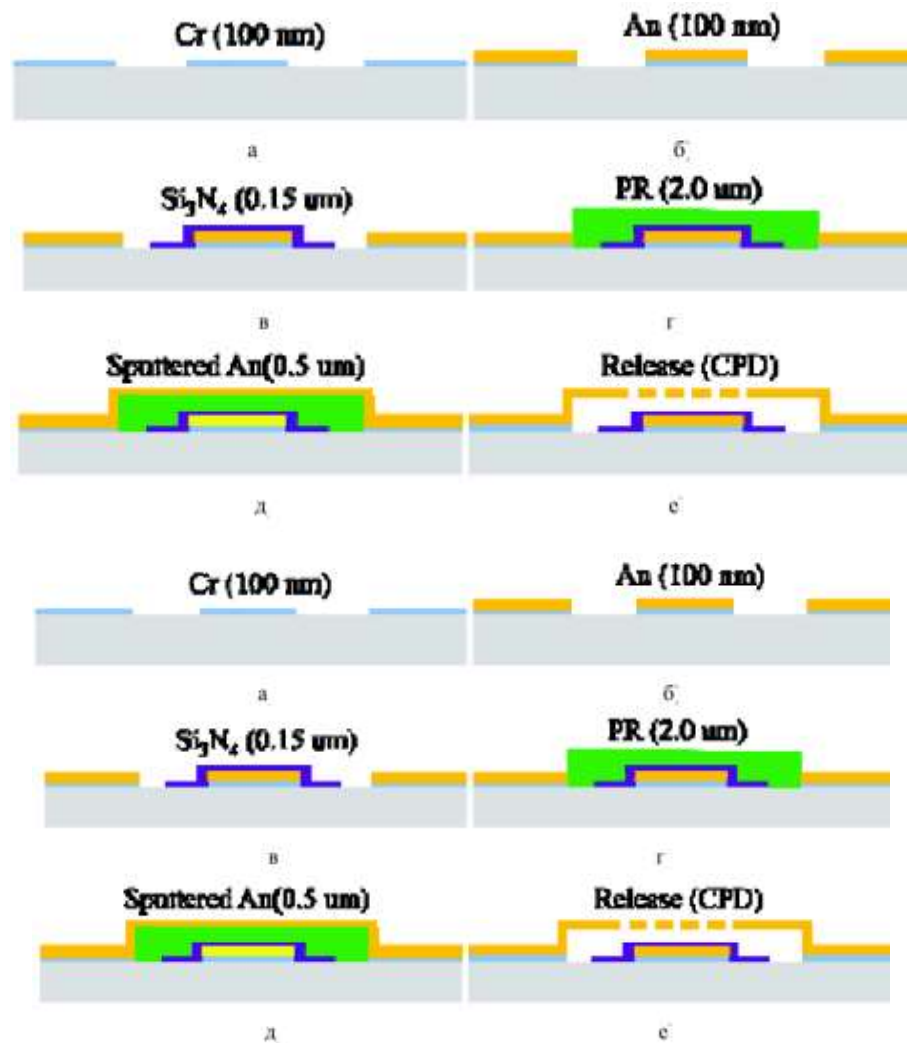


Рисунок 1.6 – Зображення різних частин конструкції MEMS перемикача з перфорованою мембраною [3]

Основою ключа є перфорована мембрана, яку утримують у рівновазі 4 підвіси L-подібної конфігурації. Як зазначається, наведена конструкція дозволяє знизити напругу включення порівняно з конструкцією, де мембрана не має перфорації і жорстко закріплена на кінцевих опорах. Мембрана розташована над копланарною лінією передачі. Лінія передачі сигналу використовується як один з електродів.

Ключ сформований на скляній підкладці із використанням процесів поверхневої мікромеханічної обробки. Послідовність технологічного процесу формування структури схематично наведено на рис. 1.7. а, б



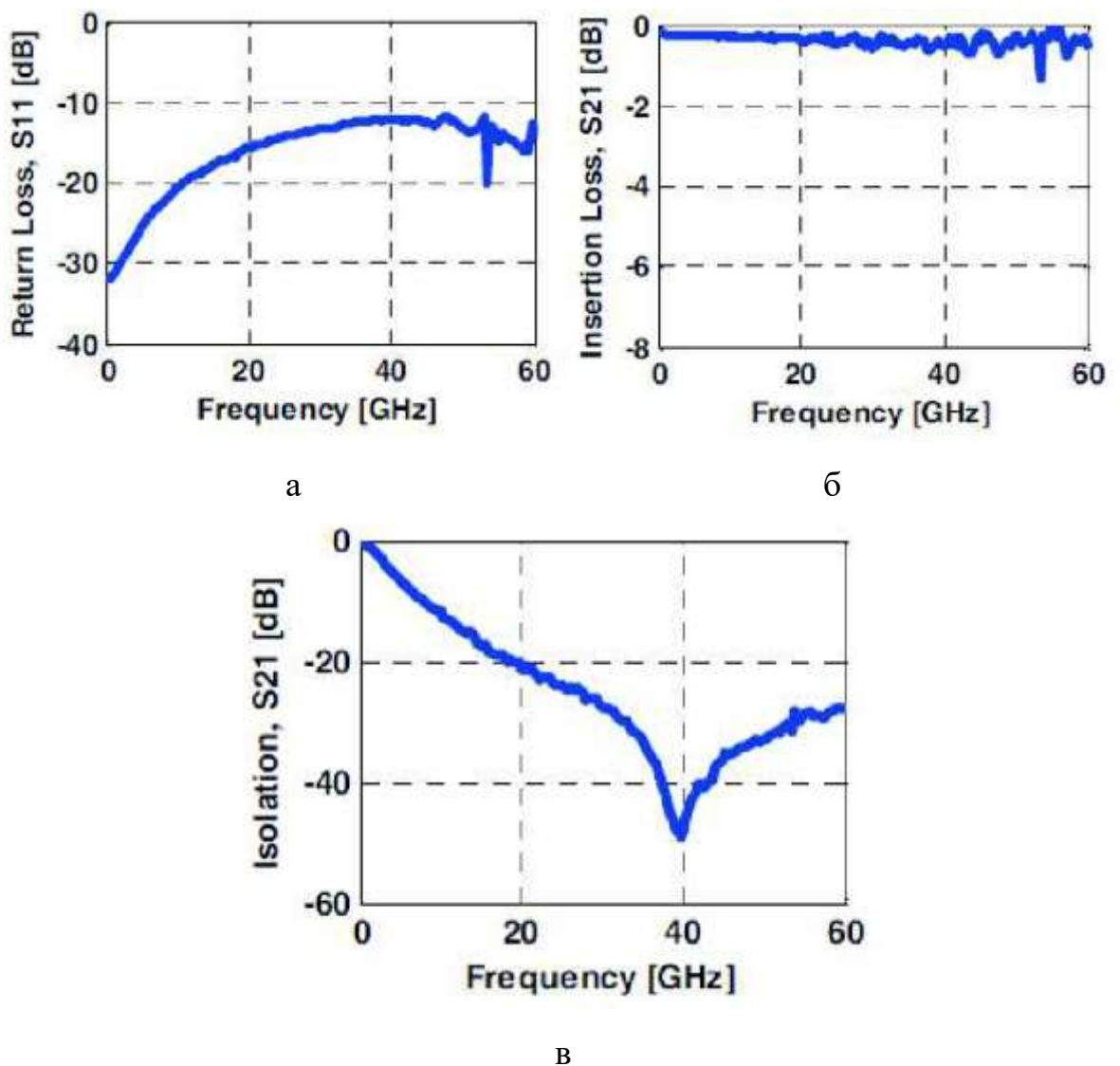
а – нанесення шару Cr (100 нм); б – нанесення шару Au (100 нм); в - формування шару діелектрика Si₃N₄ (150 нм); г - нанесення жертвового шару (2 мкм); д – нанесення шару Au (0,5 мкм); е – перфорування мембрани

Рисунок 1.7 – Технологічний маршрут виготовлення ВЧ MEMS перемикача з перфорованою мембраною [3]

Копланарна лінія передачі сигналу створена вакуумним напиленням контактної системи Cr/Au/Cr товщиною 1 нм/100 нм/10 нм відповідно. Шар Si₃N₄ товщиною 150 нм наносився методом плазмо-хімічного осадження з газової фази (PECVD) для формування шару діелектрика між мембраною і сигнальною лінією. мкм. Для формування необхідного зазору висотою 2 мкм. Отвори в мембрані діаметром 10 мкм, по-перше, прискорюють травлення жертвового

шару і по-друге, покращують динамічні характеристики перемикача за рахунок зменшення часу згасання коливаль, а значить і часу перемикування.

Напруга включення MEMS перемикача такої конструкції становило величину 4,8 В. Перемикач показав добрі частотні параметри. Втрати сигналу склали менше 0,55 дБ, ізоляція вхідного сигналу в розімкнутому стані – 47,6 дБ на частоті 40 ГГц. Частотні характеристики параметрів, що показав комутаор представлені на рис. 1.8



а - втрати на відображення; б - втрати, що вносяться; в) рівень ізоляції

Рисунок 1.8 - Частотні характеристики ВЧ MEMS до комутатора [3]

Однак на частотах до 20 ГГц ізоляція погіршується до значень вище – 20 дБ, зростають також втрати на відбиття у вказаному відносно низькочастотному діапазоні.

Таким чином, така конструкція MEMS перемикача не може використовуватися в X-діапазоні частот (до 5 ГГц).

1.3 ВЧ MEMS перемикач з п'єзоелектричним актуатором

Для зниження високої керуючої напруги була запропонована проста структура, яка легко інтегрується з іншими схемами [4]

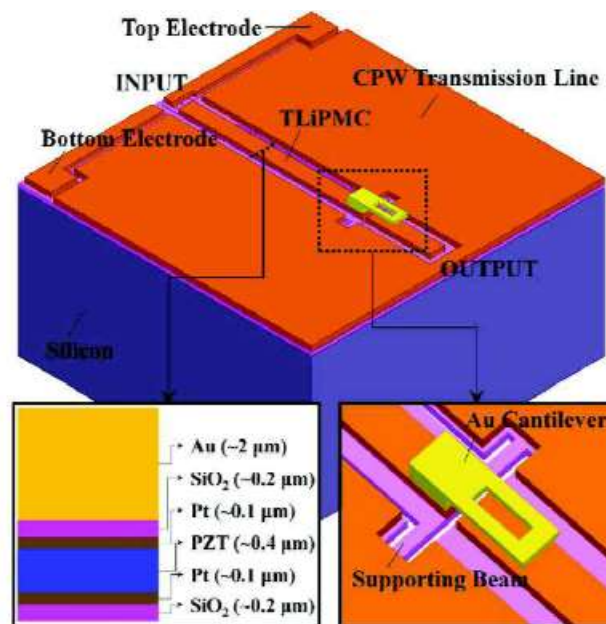


Рисунок 1.9 – Схематичне зображення MEMS комутатора з п'єзоелектричним актуатором [4]

Запропонований перемикач є багатошаровою структурою метал/п'єзоелектрик/метал (рис. 1.9), інтегровану з копланарною лінією передачі сигналу. Як п'єзоелектричний матеріал був використаний цирконат-титанат свинцю $\text{Pb}(\text{Zr}_{0,52}\text{Ti}_{0,48})\text{O}_3$, оскільки має високе значення п'єзоелектричного коефіцієнта. Для нижнього і верхнього електродів була використана платина, тому що у неї досить висока питома електропровідність, міцність на вигин і

адгезія до матеріалу п'єзоелектрика. Центральний електрод копланарної лінії електрично ізольований від кантилевера шаром діелектрика SiO_2 . Для отримання відповідних ВЧ параметрів величина зазору між центральним електродом і кантилевером була обрана 2 мкм.

На рисунку 1.10 схематично наведено технологічний маршрут виготовлення такого ВЧ MEMS комутатора, в якому використовуються різні методи мікромеханічної технології.

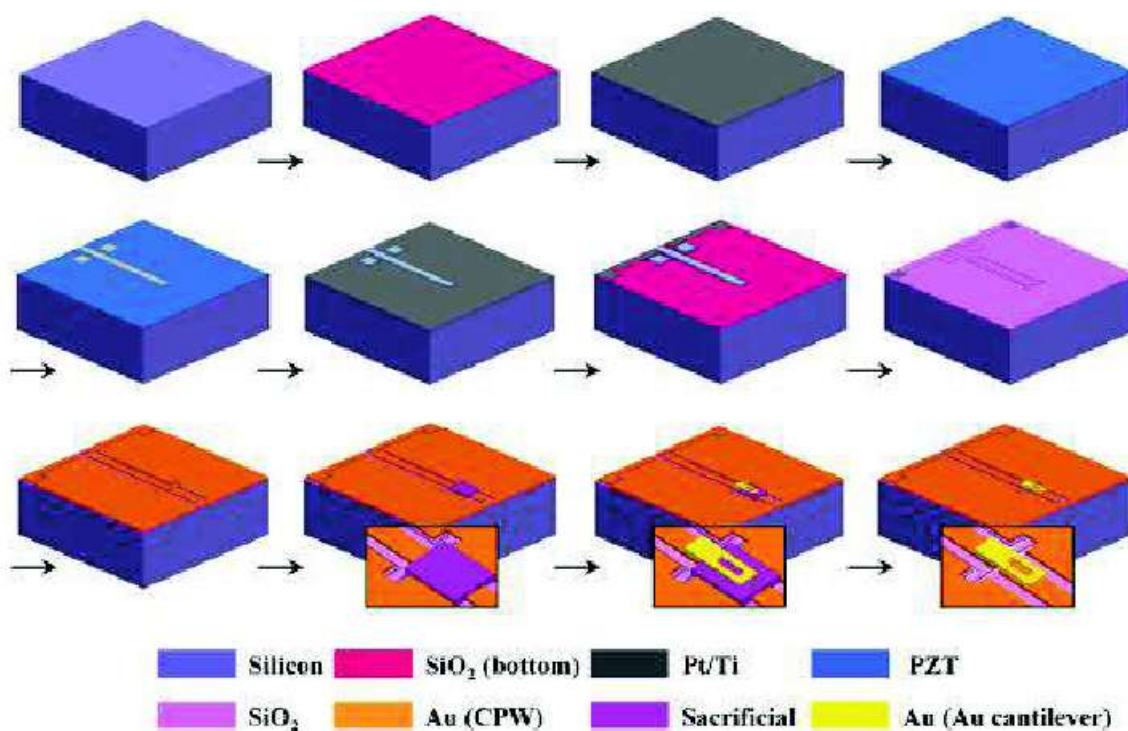


Рисунок 1.10 – Технологічний маршрут виготовлення ВЧ MEMS комутатора з п'єзоелектричним актуатором [4]

На першому етапі термічним окисненням вирощується шар діелектрика SiO_2 на кремнієвій підкладці. Після стандартної процедури очищення поверхні підкладки наносилася плівка платини завтовшки 150 нм методом розпилення. Для покращення адгезії попередньо наносився тонкий шар титану завтовшки 10 нм.

На наступному етапі був створений шар цирконату титанату свинцю ($\text{Pb}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$), використовуючи золь-гель технологію. Потім отриманий шар

цирконату-титанату свинцю кристалізувався термічним відпалом при температурі 650 °С протягом 40 хв. Топологія верхнього та нижнього електродів формувалася в стандартному процесі фотолітографії. Для ізоляції структури п'єзоелектричного актюатора від сигнальної лінії технологією CVD було нанесено шар діоксиду кремнію товщиною 200 нм.

Далі напиленням плівки золота завтовшки 100 нм формувалися лінії передачі сигналу.

За рахунок створення жертвового шару товщиною 2 мкм вирішувалося питання створення зазору між кантилевером та сигнальною лінією. На наступному етапі був сформований кантилевер із золота на сигнальній лінії електроосадженням з наступним плазмовим травленням

На рисунку 1.11 представлено залежність ВЧ-параметрів розглянутого перемикача від частоти

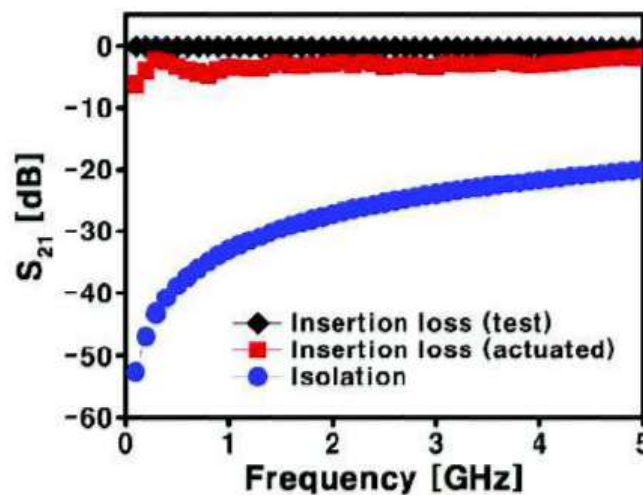


Рисунок 1.11 – Частотные характеристики ВЧ MEMS коммутатора с пьезоэлектрическим кантилевером [4]

Керуюча напруга такого ключа склала величину близько 2 В. Слід зазначити, що це відбилося на частотних властивостях і пристрій застосовується лише на частотах до 5 ГГц (рис. 1.1). До того ж рівень ізоляції від сигналу в

розімкнутому стані була вищою за -20 дБ, а втрати, що вносяться, не перевищують $0,4$ дБ.

1.4 MEMS комутатор з торсіонним кріпленням

В одній з робіт був представлений MEMS комутатор з дуже низькою напругою, що управляє [5]. Для цього в конструкції використовувалися торсіонні кріплення балки до якорів (рис. 1.12). Балка була виготовлена з нікелю, оскільки його властивості дозволяють уникнути градієнта механічної напруги в структурі. З тієї ж причини, щоб уникнути небажаних деформацій під час експлуатації, товщина балки становила 15 мкм. Принцип роботи MEMS перемикача такої конструкції полягає у наступному.

Під час подачі напруги включення V_{PI} за рахунок електростатичних сил балка притягується до нижнього електрода; відбувається контакт між стоком та виступом на балці. Напруга V_{PI} подається між витком та затвором.

Для того, щоб балка опустилася на протилежний контакт, необхідно подати напругу, що повертає. V_{REC} . Ця напруга подається відносно витку і повертає затвора. V_{REC} менша за напругу включення V_{PI} .

Це пов'язано з наступним. Після зняття напруги включення балка повертається у вихідне положення за рахунок сил пружності. Торсіонні кріплення дозволяють їй вільно обертатися навколо центральної осі, тому напруга, необхідна для притягування балки до протилежної сторони, виявляється меншою за напругу включення. Для зменшення величини зазору між балкою і сигнальною лінією створено спеціальний виступ.

На рисунку 1.13 наведено технологічний процес виготовлення перемикача. Спочатку нанесенням контактної системи хром (5 нм)/золота (50 нм) та створенням топологічного рисунка УФ літографією та рідинного хімічного травлення формувалися електроди.

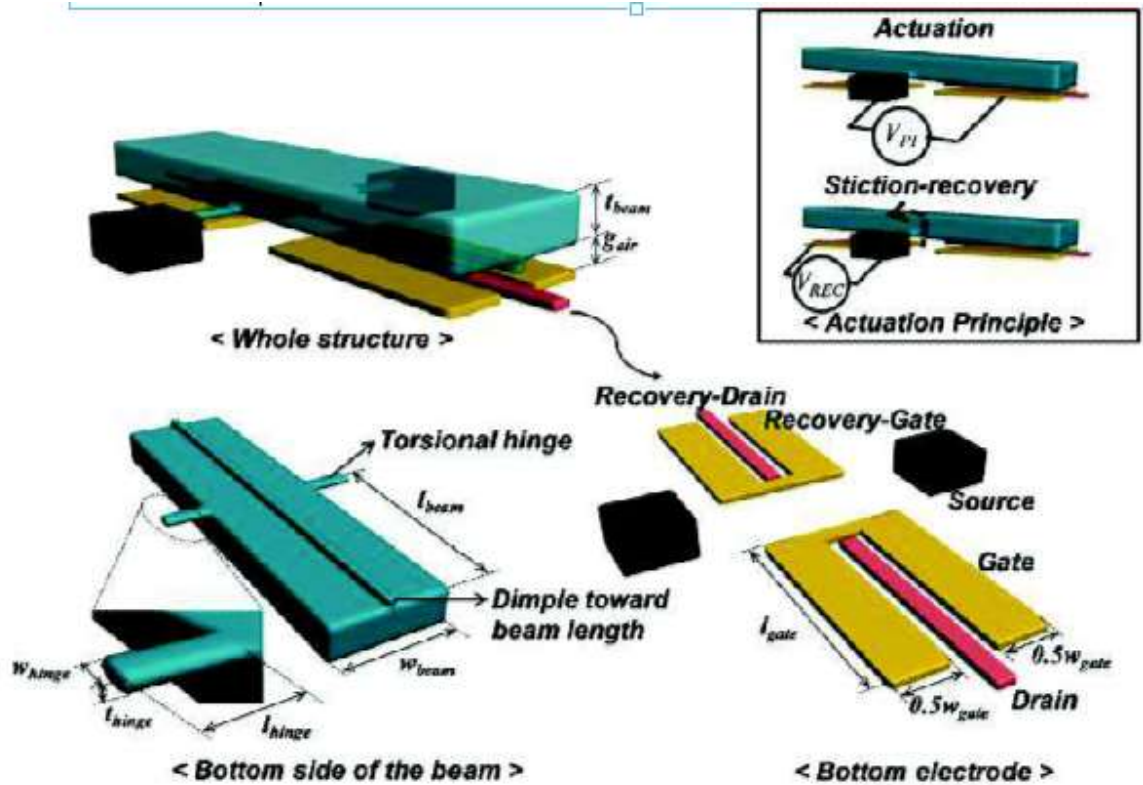
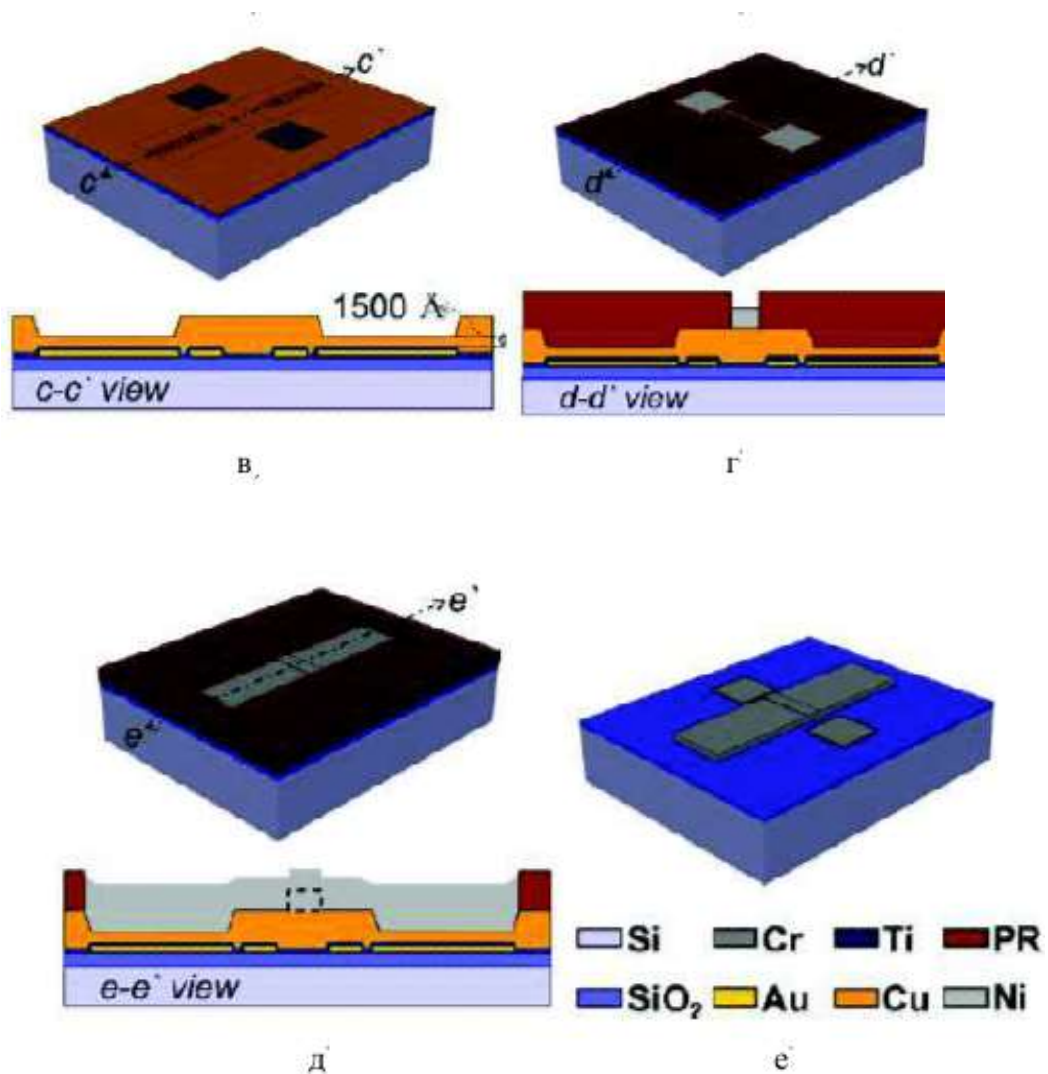


Рисунок 1.12 – Схематичне зображення MEMS перемикача з торсіонним кріпленням [5]

На наступному етапі після осадження шару Ti (50 нм) в якості жертвовного шару для створення виступу наносився шар Cu (250 нм). Шар Ti використовувався в якості дифузійного бар'єру. Після цього осаджувався ще один жертвний шар Cu (150 нм) для формування якорю. Виступ висотою 1.5 мкм та балка завтовшки 15 мкм отримані електроосадженням Ni. Для зниження градієнта механічних напруг балка виготовлялася тільки з нікелю, без використання матеріалів звичайних для створення електродів, таких як золото. З тією ж метою товщина балки склала цілих 15 мкм – це дало можливість уникнути небажаної деформації, що викликана градієнтом напружень. На останньому етапі, використовуючи рідинне травлення в селективних розчинах, видалявся жертвний шар міді та шар титану.

Така конструкція дозволила досягти керуючого напруги величиною приблизно 3 В. На зниженні напруги також відбилося використання матеріалу

балки з низьким модулем зсуву (76 ГПа у нікелю) та малого повітряного зазору (0,65 мкм).



з торсійними кріпленнями: а - формування нижніх електродів; б - осадження першого жертвовного шару Cu та формування виступу; в - осадження другого жертвовного шару Cu та формування якоря; г - електроосадження Ni для формування виступу; д - електроосадження Ni для формування балки; е - видалення жертвовного шару Cu

Рисунок 1.13 - Процес виготовлення ВЧ MEMS перемикача [5]

На рис. 1.14 та 1.15 зображені залежності внесених втрат, втрат на відбиття та ізоляції від частоти сигналу

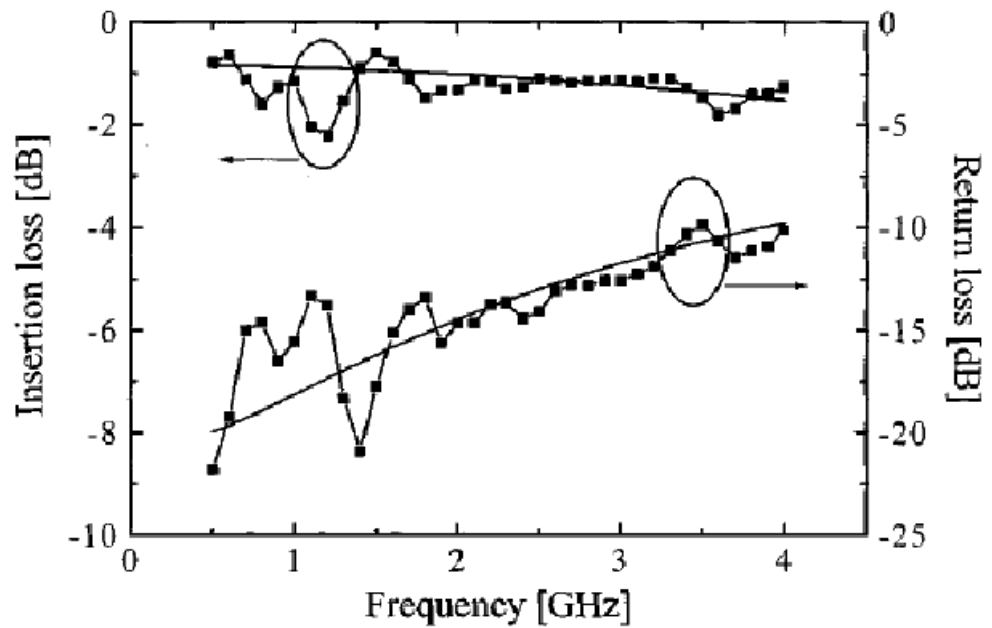


Рисунок 1.14 – Втрати, що вносяться, на відображення MEMS перемикача з торсіонними кріпленнями: розрахункова - суцільна лінія - лінія з точкою [5]

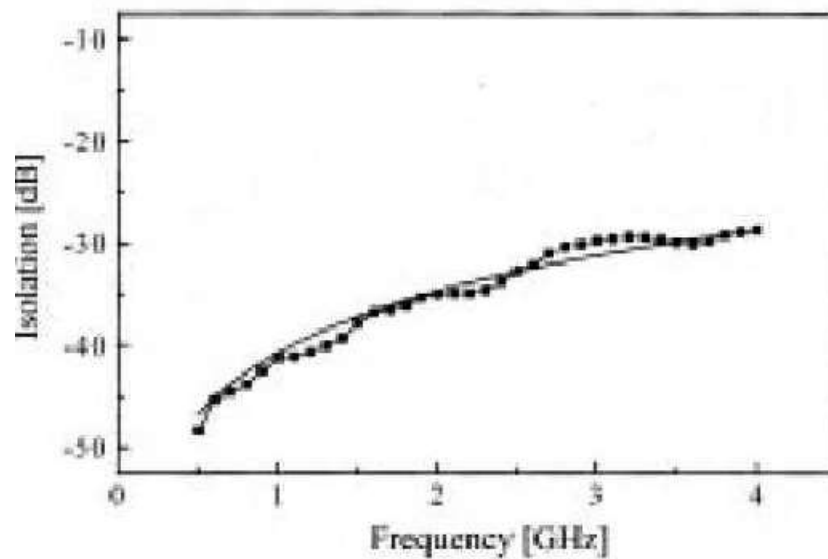


Рисунок 1.15 – Ізоляція сигналу при розімкнених електродах MEMS перемикача з торсіонними кріпленнями: розрахункова - суцільна лінія; експериментальна – лінія з точкою [5]

Серед недоліків розглянутого пристрою слід відзначити його незадовільні частотні характеристики: робоча частота його обмежена X-діапазоном (5 ГГц), втрати, що вносяться на низьких частотах, перевищують 2 дБ (рис. 1.14).

1.5 ВЧ MEMS перемикач зі спіралеподібним підвісом

Для зниження керуючої напруги було запропоновано конструкцію, зображену на рисунку 1.16 [6]. Перемикач складається з перфорованої рухомої мембрани з виступом, що кріпиться до вхідної лінії передачі сигналу за допомогою спіралеподібного підвісу. Перфорація мембрани дозволяє зменшити час згасання, що призводить до зменшення часу перемикачання. Виступ доданий для зменшення зазору між рухомою пластиною і вихідною лінією передачі. Для розв'язки вхідного сигналу від джерела постійної напруги, що комутує, нанесені високоомні доріжки.

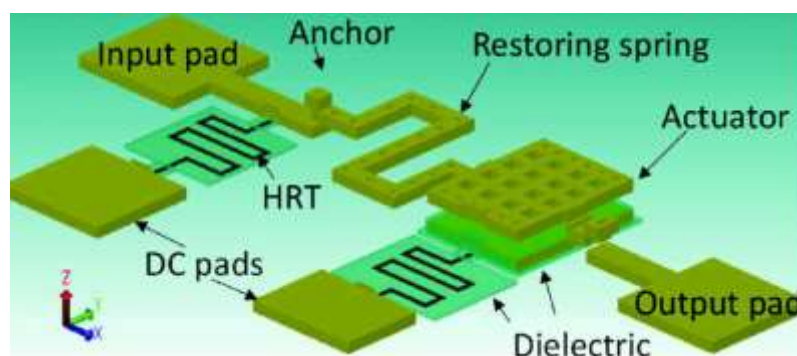


Рисунок 1.16 – ВЧ MEMS перемикач зі спіралеподібним підвісом [6]

Принцип дії цього ключа MEMS аналогічний розглянутим раніше. При подачі напруги на електрод, що керує, мембрана відхиляється від вихідного положення внаслідок дії сил електростатичного тяжіння. Мембрана притягується до вихідної лінії передачі та відбувається контакт.

Технологічний процес реалізації такого MEMS перемикача представлений на рисунку 1.17.

На першому етапі на алюмінієву підкладку завтовшки 0.635 мм наноситься шар TiW завтовшки 50 нм для створення високоомних електропровідних доріжок.

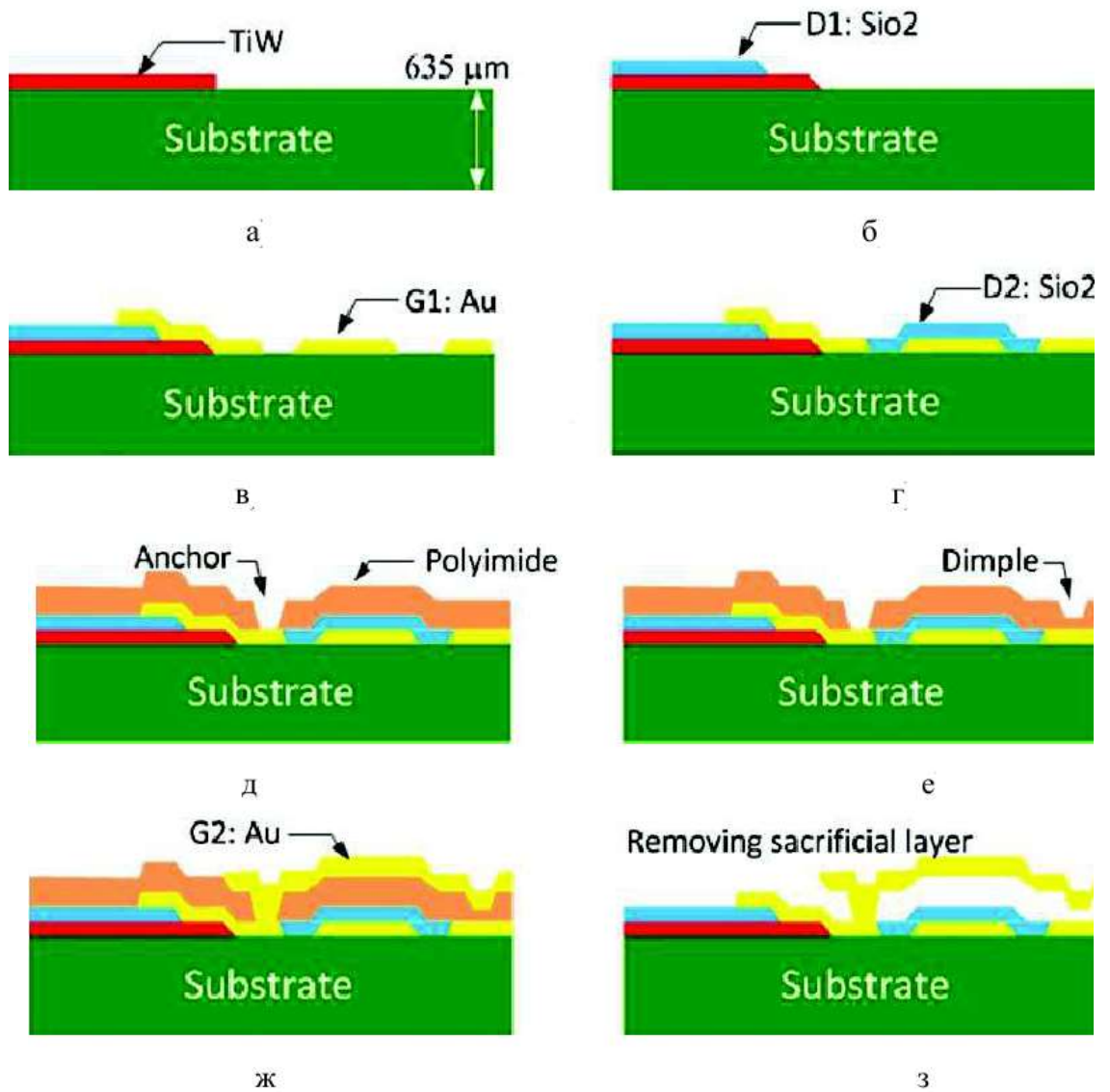


Рисунок 1.17 – Технологічний процес виготовлення ВЧ MEMS ключа зі спіралеподібним підвісом [6]

На другому етапі нанесеться шар SiO_2 товщиною 0,7 мкм (позначень D1 на рис. 1.17) методом PECVD.

На третьому етапі відбувається нанесення двошарового покриття, що складається з хрому та золота товщиною 40 нм та 1 мкм відповідно (шар G1). Хром використовується як адгезійний шар. Топологічний рисунок створюється фотолітографією.

На четвертому етапі знову нанесеться шар SiO_2 завтовшки 0,7 мкм (позначень D2 на рис. 1.20) методом PECVD. Як адгезійний шар між D2 і G1 використовується шар TiW товщиною 30 нм.

На п'ятому етапі відбувається нанесення шару поліімиду товщиною 2,5 мкм як жертвний шар. Використовуючи процес іонного травлення, формується якір.

На шостому етапі формуються порожнини методом іонного травлення.

На сьомому етапі напилюється шар золота завтовшки 2 мкм.

На восьмому етапі в кисневій плазмі видаляється жертвний шар.

Напруга включення ВЧ MEMS ключа такої структури становить величину 0,5, а напруга вимикання - 0,3 В (рис. 1.18). Час перемикання становить 0,5 мс при напрузі 0,5 В. Час перемикання зменшується до 0,2 мс зі збільшенням напруги до 1 В (рис. 1.19).

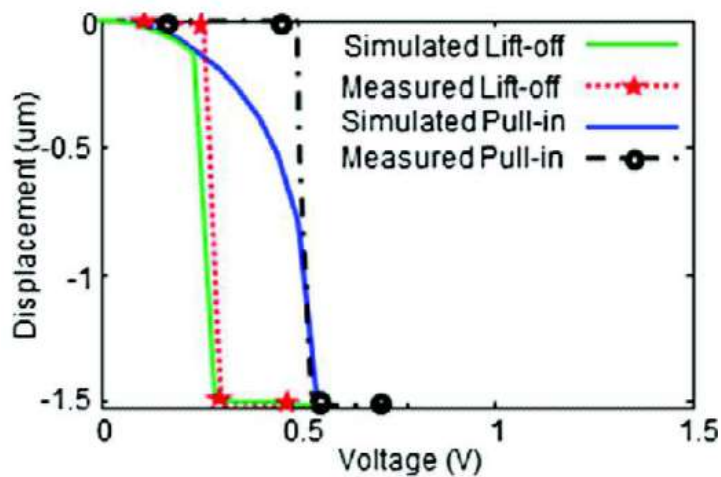


Рисунок 1.18 – Залежність часу відхилення мембрани від напруги [6]

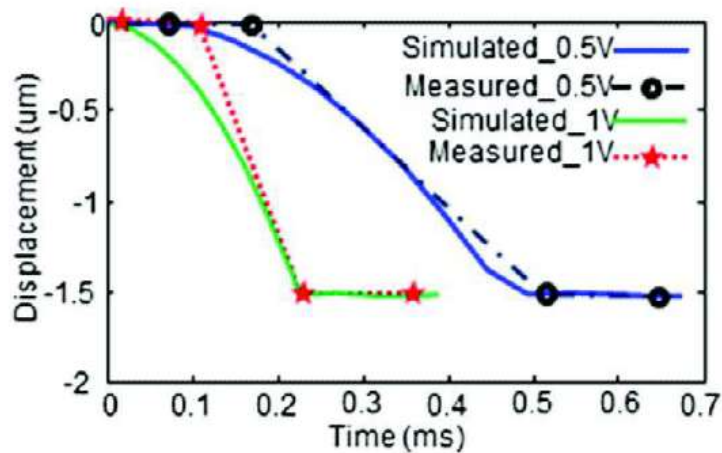


Рисунок 1.19 – Залежність відхилення мембрани від часу [6]

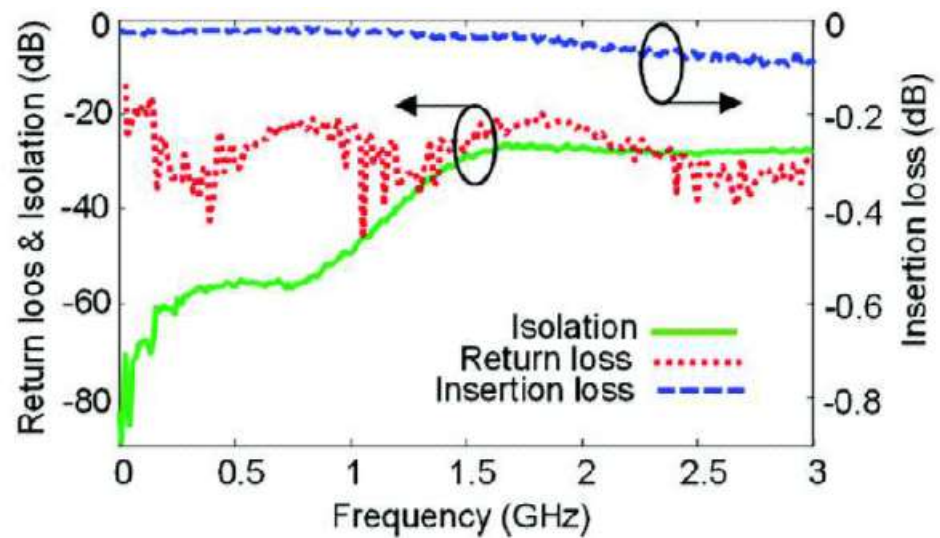


Рисунок 1.20 – ВЧ-параметри MEMS ключа зі спіральним підвісом [6]

ВЧ-параметри MEMS ключа зі спіралеподібним підвісом представлені на рисунку 1.20. Ключ працює в X-діапазоні до 5 ГГц.

1.6 Порівняння параметрів MEMS комутаторів різних конструкцій

У таблиці 1.1 наведено порівняння розглянутих конструктивних рішень MEMS перемикачів за основними параметрами. Як очевидно з таблиці, зменшення керуючого напруги загалом призводить до погіршення інших властивостей перемикача.

Таблиця 1.1 – Порівняльна таблиця параметрів розглянутих ВЧ MEMS перемикачів

Параметр	Конструкція MEMS перемикача				
	Ключ із підвісам и з парилени у-С	Ключ із перфорованою мембраною	Ключ із п'єзоелектричним актуатором	Ключ із торсіонними кріпленнями	Ключ зі спіралеподібним підвісом
Керуюча напруга,	6	4,8	2	3	0,5

Час включення, мс	100	-	-	-	0,5
діапазон частот, ГГц	-	від 20 до 60	до 5	до 5	до 3
Ізоляція, дБ		>20 47,6 (40 ГГц)	>20	>30	>27
Внесені втрати, дБ	-	<0,55	<0,4	<2,5	<0,1

У представленому аналізі конструктивних і технологічних рішень сучасних ВЧ MEMS комутаторів сигналів, розглянуто можливості поліпшення їх технічних характеристик, а саме: зниження керуючої напруги, внесених втрат і ступеня ізоляції від вхідного сигналу при розімкнених контактах, зменшення часу спрацьовування та розширення частотного діапазону. До певної міри величини цих параметрів взаємопов'язані і зростання одного може призвести до зниження іншого. Проте проведений аналіз дозволяє виділити виділити два основних напрями вирішення цієї проблеми: створення нової, оригінальної конструкції перемикача з урахуванням нових технологічних можливостей та застосування нових матеріалів.

У таблиці 1.1 наведено порівняння розглянутих конструктивних рішень MEMS перемикачів за основними параметрами. Як очевидно з таблиці, зменшення керуючого напруги загалом призводить до погіршення інших властивостей перемикача.

2 КОНТРОЛЬ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ВЧ MEMS КЛЮЧІВ

2.1 Фактори, що впливають на стабільність характеристик MEMS ключів

Існують фактори, що погіршують параметри MEMS коммутаторів у процесі їх експлуатації, що може призводити навіть до відмов.

Для перемикачів з омичним контактом при комутації сигналів низької потужності (< 1 мВт) найчастішими механізмами відмови є змінення механічних властивостей контактів, їх ерозія, і створення діелектричних плівок на поверхні контактів. Усунення цієї проблеми вимагає ретельного підбору металів для контактів на етапі розробки. У перемикачах для комутації сигналів потужністю від 10 до 100 мВт (середньої потужності) відмови відбуваються через високу щільність струму в контакті і переміщенням матеріалу з одного контакту на інший. Ця проблема може бути усунена також вибором металів з кращими властивостями контакту і збільшенням зусиллям стискання контактів (збільшенням керуючої напруги). В пристроях для комутації сигналів потужністю потужних перемикачів від 100 мВт і вище основним чинником відмови є підвищення температури за рахунок високої щільності струму і перенесення матеріалу в контакті. Цьому випадку при проектуванні конструкції слід передбачити можливість кращого охолодження контактної майданчика, збільшити сили притискання рухомого контакту і обирати більш стійкі матеріали або ускладнювати контактні структури, з яких зроблені контакти

Для контакту ємнісного типу сигналів низької потужності основним чинником відмови є зарядка діелектрика. Для її усунення створюють більш якісний діелектричний шар і використовують керуючу напругу змінної полярності. У випадку комутації сигналів середньої потужності на можливість відмови головним чином впливає зарядка діелектрика і висока щільність струму. Для вирішення проблеми, що пов'язана з високою щільністю струму збільшують товщину металевої мембрани і її кріплення. У перемикачах високої потужності найчастіше відбувається мимовільна комутація і відмови від високої щільності

струму. Мимовільне перемикання відбувається, якщо напруга сигналу у ВЧ електроді, стає співставною з керуючою. виправити ситуацію можливо збільшенням жорсткості конструкції перемикача та / або керування окремими від ВЧ електрода електродів. [7]

2.2 Методики тестування параметрів MEMS перемикачів

Завданням тестування є визначення відповідності параметрів MEMS перемикача заявленим виробником параметрам, або визначення можливості застосування певної моделі комутатора для конкретного технічного рішення з нестандартним режимом експлуатації. Подібні випробування необхідні також при тестуванні нових конструктивних і технологічних рішень ВЧ комутаторів.

Дослідження включають вимір таких основних параметрів ВЧ перемикачів.

По-перше, необхідно виміряти критичну напругу ключа.

По-друге, виміряти величину часу включення.

По-третє, провести вимірювання частотних характеристик ключа, а саме:

- вимірювання ізоляції;
- вимір внесених втрат;
- вимірювання втрат на відбиття;

Нижче наведена методика вимірювань застосовувалася для тестування параметрів експериментального омичного ВЧ MEMS ключа з електростатичним управлінням в діапазоні частот від 1 до 12 ГГц і з цим пов'язаний тип позначених на відповідних схемах вимірювальних приладів [9].

2.2.1. Вимірювання критичної напруги Дослідження проводилися з використанням стандартної вимірювальної тестової плати типу RMSW201-EV12. Плата обладнана двома парами коаксіальних радіочастотних роз'ємів SMA, одна з яких відносяться до калібрувальної лінії, а друга – до лінії для вимірювання частотних характеристик ключа, що тестується. На платі

розташовані 2 резистори R_S та R_D (рис. 2.1) номінальним опором 50 кОм та контактні майданчики для подачі керуючої напруги на ключ.

Тестова плата підключається до вимірювального обладнання згідно зі схемою, наведеною на рисунку 2.1.

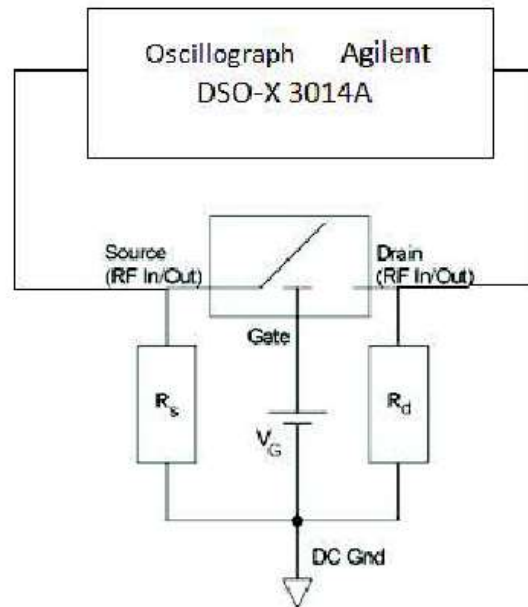


Рисунок 2.1 – Схема вимірювання критичної напруги [9]

До тестової вимірювальної плати приєднується джерело живлення постійної напруги (V_G на рис. 2.1). До основної НВЧ лінії вимірювальної плати підключається осцилограф. Використовуючи вбудований в осцилограф генератор на вхід НВЧ лінії подають сигнал амплітудою 300 мВ. Збільшуючи напругу живлення, за допомогою осцилографа спостерігають появу сигналу на виході НВЧ лінії. Отримана напруга є критичним напругою MEMS ключа.

2.2.2 Вимірювання часу включення Вимірювання цього параметра проводяться згідно зі схемою, наведеною на рисунку 2.2. Для цього необхідно підключити зовнішній генератор сигналів до ключа на транзисторі. З зовнішнього генератора подати сигнал у вигляді меандру частотою 10 Гц та амплітудою 4 В

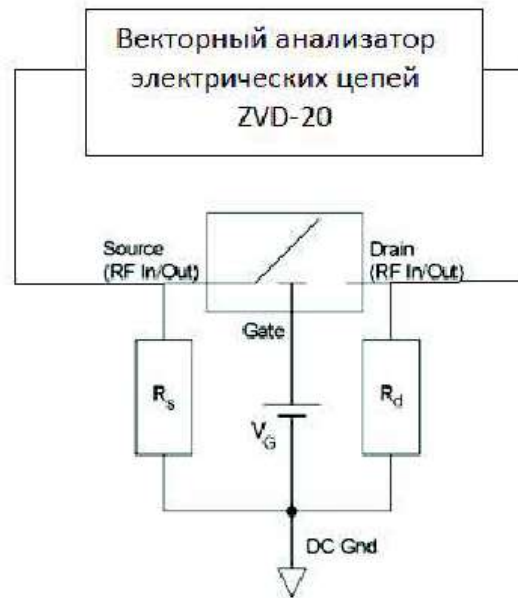


Рисунок 2.3 – Схема вимірювання частотних характеристик [9]

Далі проводяться вимірювання ізоляції НВЧ лінії згідно з документацією на аналізатор. Результати вимірювання зберігаються у внутрішній пам'яті.

Для вимірювання внесених втрат до тестової вимірювальної плати відключають джерело живлення і встановлюють напругу вище критичної.

Не виключаючи джерела живлення проводять вимірювання втрат на відбиття НВЧ лінії згідно з документацією на аналізатор і зберігають результати вимірювання.

ВИСНОВКИ

У представленому аналізі основних конструктивних та технологічних рішень сучасних ВЧ MEMS комутаторів сигналів розглянуто можливості поліпшення їх технічних характеристик, а саме:

- зниження керуючої напруги,
- внесених втрат,
- ступеня ізоляції від вхідного сигналу при розімкнених контактах,
- зменшення часу спрацьовування,
- розширення частотного діапазону.

До певної міри величини цих параметрів взаємопов'язані і зростання одного може призвести до зниження іншого. Проте проведений аналіз дозволяє виділити виділити два основних напрями вирішення цієї проблеми: створення нової, оригінальної конструкції перемикача з урахуванням нових технологічних можливостей та застосування нових матеріалів.

Розглянуті також фактори, які впливають на стабільність параметрів ВЧ MEMS перемикачів в процесі їх експлуатації. Усунення яких також знаходиться у площині застосування нових матеріалів, технологій та конструктивних рішень.

Викладено також методику вимірювання параметрів MEMS ключів необхідність у яких виникає при створенні нових конструкцій, або при зміні стандартних режимів застосування.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. В. Н. Шоффа, Е. А. Коваленко Высокочастотные микро электро-механические переключатели. URL: <http://www.materials.kiev.ua/publications/EKE/2019/29.pdf> (дата звернення 16. 05. 2025)
2. Low-actuation voltage MEMS digital-to-analog converter with parylene spring structures / Cheng-Wen Ma, Fu-Wei Lee, Hsin-Hung Liao, Wen-Cheng Kuo, Yao-Joe Yang // Sensors, 2015. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/15/9/21567> (дата звернення 16. 05. 2025)
3. S. Shekhar. Design, fabrication and characterization of capacitive RF MEMS switches with low pull-in voltage / IEEE International microwave and RF conference, 2014.
URL: https://www.googleadservices.com/pagead/aclk?sa=L&ai=DChsSEwj48JWEycNAxU9HqIDHb3vBSMYACICCAEQAhocbGU&co=1&gclid=Cj0KCQjw0erBBhDTARIsAKO8iqRm7G2sdXw4J2r45KXyqvCIDxD_rvkraJg_1299LXiGcIpELrps2WUaAgYOEALw_wcB&ohost=www.google.com&cid=CAESV-D2EWGt8EA-bMTkhHXyquBTI1qg_taRQRUMTuGIP5i6inXU04H1VQDuQMhB5uGyeMpE3CpYS0ZoNVWPISr1LkbuveInyGDI61q_L6pGm9WonHRckYBoPw&category=acrep_v1_40&sig=AOD64_1CeY2eDP6qvArzWghefXfb554SA&q&adurl&ved=2ahUKEwiLqo-Eyc-NAxXxGRAIHfPrHjcQ0Qx6BAgNEAE (дата звернення 16. 05. 2025)
4. Hyun Woo Yu. Low-voltage micromechanical RF Switch based on a piezoelectric micro-cantilever integrated with transmission Line // Journal of the Korean Physical Society. 2015, vol. 67.
URL: https://www.researchgate.net/publication/285746404_Low_voltage_micromechanical_RF_switch_based_on_a_piezoelectric_micro-cantilever_integrated_with_a_transmission_line (дата звернення 16. 05. 2025)
5. An ultra-low voltage MEMS switch using stiction-recovery actuation / Min-Wu Kim, Yong-Ha Song, Hyun-Ho Yang, Jun-Bo Yoon // Micromechanics and

Microengineering,

2013.

[URL:https://www.researchgate.net/publication/258297216_An_ultra-low_voltage_MEMS_switch_using_stiction-recovery_actuation](https://www.researchgate.net/publication/258297216_An_ultra-low_voltage_MEMS_switch_using_stiction-recovery_actuation) (дата звернення 16. 05. 2025)

6. Ali Attaran. Ultra low actuation voltage RF MEMS switch // Springer, 2015.
 URL:https://www.googleadservices.com/pagead/aclk?sa=L&ai=DChsSEwjIyYPA0MNAxWSC6IDHUwVCcgYACICCAEQABoCbGU&co=1&gclid=Cj0KCQjw0erB BhDTARIsAKO8iqQSylEube0vQqOjiXXNRMXa1kbSPKdb7EDKorjCxnXRq1UD1il8ei0aAmp_EALw_wcB&ohost=www.google.com&cid=CAESV-D2PWstilwyONEgWpt6LnJhMZUWtY1I_Hg3S8XdI6MzTZhAA95rq5Qv7zBewu5kjaKk9mcYBsPmDmvtN0ymkpgd_oRpQpBusACPiyW0dXma_28bvBaQ&category=acrep_v1_40&sig=AOD64_24AQPINNJQabanskKdrWhGkrv4kg&q&adurl&ved=2ahUKEwiBtP2_0M-NAxUIIhAIHZ0GO0MQ0Qx6BAgNEAE (дата звернення 16. 05. 2025)

7. Карина Захарова, Владислав. Євсєєв Аналіз типів МЕМС перемикачів, їх переваги та недоліки / M&MS 2019 24-25 October, Kharkiv, UKRAINE.
 URL:<https://openarchive.nure.ua/bitstreams/766cb044-0668-49e6-84d0-6fab135c27e0/download> (дата звернення 16. 05. 2025)

8. SPST, High-Isolation, RF-MEMS Switch DC to 20 GHz // www.radantmems.com.URL:http://www.radantmems.com/radantmems.data/Library/Radant-Datasheet221_2.0.pdf. (дата звернення 16. 05. 2025)

9. RMSW201-EV12 Evaluation Test Board DC to 12 GHz for RMSW201 // www.radantmems.com.URL:http://www.radantmems.com/radantmems.data/Library/Radant-Datasheet-RMSW201-EV12_2.1.pdf. (дата звернення 16. 05. 2025)

10. Khadeijeh Khodadady. Design and modeling of a novel RF MEMS series switch with low actuation voltage // Springer, 2020.
 URL:https://www.researchgate.net/publication/282413465_Design_and_modeling_of_a_novel_RF_MEMS_series_switch_with_low_actuation_voltage(дата звернення 16. 05. 2025)

11. ДСТУ 7.1:2006. Система стандартів з інформації, бібліотечної та видавничої справи. Бібліографічний запис. Бібліографічний опис. Загальні вимоги та правила складання : чинний з 01.07.2007. – Київ : Держспоживстандарт України, 2007. – 47 с.

12. ДСТУ 3582:2013. Інформація та документація. Бібліографічний опис. Скорочення слів і словосполучень українською мовою. Загальні вимоги та правила : чинний з 01.01.2014. – Київ. : Мінекономрозвитку України, 2014. – 15 с.

13. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. – Київ. : УкрНДНЦ, 2016. – 16 с.

14. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання : чинний з 01.07.2007. – Київ. : УкрНДНЦ, 2016. – 26 с