

УДК 621.3.049.77:620.3

О.І. Филипенко, О.О. Чала, М.І. Відешин

*Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків*

## ТЕХНОЛОГІЧНІ ДЕФЕКТИ ВИРОБНИЦТВА КРЕМНІЄВИХ ПІДКЛАДОК ДЛЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ВІДБИВАЮЧИХ ПОВЕРХОНЬ МОЕМС-ПЕРЕМИКАЧІВ

У статті розглянуто основні дефекти та способи їх мінімізації, що виникають під час виробництва кремнієвих підкладок, які використовуються у якості функціональних відбиваючих поверхонь для МОЕМС-перемикачів та безпосередньо впливають на якість оптичних дзеркал та внесені втрати у оптичну систему в цілому.

**Ключові слова:** мікрооптоелектромеханічні компоненти, оптичні перемикачі, оптичні дзеркала, технології, технології виробництва, кремній, втрати, кривизна оптичних поверхонь, технологічні дефекти, спотворення сигналу, технологічний контроль.

### Номенклатура

МЕМС – мікроелектромеханічні системи;  
МОЕМС – мікрооптоелектромеханічні системи;  
ТП – технологічний процес;  
ТСМ – тунелюючий скануючий мікроскоп.

### Вступ

МЕМС технологія – це технологія виготовлення електромеханічних структур, що створені в обмеженому обсязі твердого тіла або на його поверхні у вигляді складних мікросистем субміліметрового розміру, що представляють собою впорядковані композиції областей матеріалу із заданим складом, структурою і геометрією, статична або динамічна сукупність яких забезпечує реалізацію процесів генерації, перетворення і передачі енергії в тісній інтеграції з сприйняттям, обробкою, трансляцією і зберіганням інформації при виконанні запрограмованих операцій і дій в необхідних умовах експлуатації з заданими функціональними, енергетичними, часовими і надійнісними показниками.

Особливою сферою застосування МЕМС є телекомунікаційні пристрої, що працюють у оптичних каналах зв'язку. Важливою перевагою МЕМС є можливість роботи на мікрорівні безпосередньо з променем світла [1].

Оптичні перемикачі – на сьогоднішній день найбільш активна область застосування МЕМС в оптичних каналах, проте вона не є єдиною.

МОЕМС-перемикачі на основі мікродзеркал застосовуються в активних джерелах, керованих фільтрах, змінних оптичних атенюаторах і пристроях корекції.

Мікроелектромеханічні перемикачі на даний момент визнаються найбільш надійними і гнучкими. Вони являють собою системи мікродзеркал, керованих мікроприводом, що налічують від сотень до тисяч дзеркальних поверхонь на одному кристалі. Дзеркала

можуть пересуватися уздовж двох (2D) або трьох (3D) осей в залежності від типу МОЕМС-пристроїв.

Той факт, що перемикання променя здійснюється без перетворення світло-електричний сигнал-світло, дозволяє уникнути обмежень спектра і спотворень сигналу, але накладає додаткові, чіткі обмеження та вимоги до якості функціональних характеристик, як окремих елементів так, і системи в цілому.

Найбільш суттєвим для оптичних перемикачів є фактична відповідність технологічних та функціональних характеристик відбиваючих функціональних поверхонь заданим.

Низка технологічних факторів, таких як: кривизна, шорсткість, деформації, різного роду мікро- забруднення можуть призвести до значних помилок в роботі системи, що характеризуються не тільки уповільненням передачі даних чи сканування, зменшенням величин потужності, що передається, та збільшенням втрат, але й спотворенням оптичного сигналу, повною або частковою втратою інформації.

Актуальність, дослідження спрямоване саме на визначення особливостей дефектів, що виникають на етапах технологічного проектування та виготовлення оптичних дзеркал і прямо впливають на якість функціональних відбиваючих покриттів оптичних компонентів МЕМС-перемикачів, що без сумніву є основною причиною внесення похибок, втрат та спотворення сигналу в оптичній магістралі в цілому.

### Основна частина

В даний час відомо більше двадцяти технологічних методів та напрямків виготовлення МЕМС та МОЕМС виробів, їх кількість невпинно збільшується.

Більшість з них базується на напівпровідникових КМОП-технологіях, у яких основним функціональним і конструкційним матеріалом є кремній [2, 3].

МОЕМС – це безліч мікропристроїв найрізноманітнішої конструкції і призначення, у виробництві яких використовуються модифіковані технологічні прийоми мікроелектроніки.

Мікроелектромеханічні системи формують комбінуванням механічних елементів, датчиків і електроніки на загальній кремнієвій підкладці за допомогою технологій мікро- та нановиробництва [4].

Всі методи можна віднести до одного з наступних класів:

- об'ємної обробки з отриманням високого аспектного відношення;
- поверхневої обробки;
- змішаної технології, що використовує перші дві;
- гібридної технології зі складанням механічних та електронних частин на рівні атомно-молекулярного зрощування;
- інші (волоконні, мікромеханічної обробки, об'ємні полімерні);
- багат шарові плівкові структури [2, 3, 5].

Перш ніж перейти до розгляду цих технологічних напрямків та технологічних дефектів, що ними спричинені, необхідно відзначити істотну значимість механічних напруг, що виникають при виготовленні мікроелементів.

Більшість технологічних процесів виготовлення багат шарових структур пов'язано з високотемпературними операціями.

Через розбіжності фізико-механічних властивостей матеріалів в шарах виникають значні механічні та структурні напруги, які суттєво впливають на технологічні процеси формування шарів і складання МЕМС та МОЕМС, як і на електричні так і на оптичні параметри і якість виробів взагалі.

Кремній є технологічним матеріалом для МЕМС внаслідок можливості його нанесення у вигляді тонких плівок, високої відтворюваності форми та властивостей напівпровідникових приладів, групових методів обробки, простоти одержання ізоляції шарів, а також хімічного захисту. Корисною властивістю кремнію є залежність швидкості травлення від орієнтації кристалічної ґратки. Вона використовується для одержання різних профілів елементів конструкції. Але він має ряд недоліків, таких як:

- зазвичай мають справу із пластинами кремнію товщиною 0,25 – 0,5 мм і діаметром 50 – 200 мм. Навіть нержавіюча сталь за таких розмірів зразків легко деформується;
- як монокристалічний матеріал кремній має тенденцію розколюватися вздовж кристалографічних площин, особливо якщо крайові, поверхневі або об'ємні дефекти структури призводять до концентрації та орієнтації напружень уздовж площин відколу;

– розколювання можуть викликати ушкодження країв або появу дефектів при різанні або скрайбуванні;

– високотемпературна обробка та багаторазове нанесення тонких плівок призводять до виникнення внутрішніх напружень, які в поєднанні із крайовими, поверхневими та об'ємними недосконалотями структури можуть призводити до напружень уздовж площин відколу.

Підсумовуючи, можна виділити три види найсуттєвіших та найпоширеніших «класичних» дефектів, що утворюються на кремнії, що є підкладкою для нанесення відбиваючого металізованого шару:

- поверхневі: утворюються за рахунок різного роду механічних обробок (ларезна порізка, шліфівка, поліровка), основним способом усунення є стравлювання поверхневого шару кремнієвої підкладки;
- кутові: за рахунок анізотропного травлення, що викликає зародки тріщин – основним способом усунення є використання ізотропного травлення, за допомогою якого закруглюються краї підкладки, що практично виключає (мінімізує) кутові дефекти;
- об'ємні: виникають за рахунок термообробки та призводять до виникнення внутрішніх напружень, які в поєднанні із крайовими, поверхневими та об'ємними недосконалотями структури можуть призводити до концентрації напружень і наступного розколювання підкладки по площині.

Загальні правила, яких варто дотримуватися, для мінімізації виникнення дефектів, можна сформулювати наступним чином:

1. Кремній повинен мати якомога меншу щільність об'ємних, поверхневих і крайових дефектів, щоб число потенційних областей концентрації напружень було мінімальним.
2. Компоненти, які можуть піддаватися сильному тертю, абразивному впливу або механічним напруженням, повинні мати мінімальні розміри та укріплюватися від ударів механічною опорою, наприклад, з'єднанням зі склом методом анодного окислювання.
3. Всі процеси механічної обробки виключити, замінивши їх травленням.
4. У випадку різання, шліфування й інших механічних операцій після них варто обтравлювати краї та поверхню, що піддавалися механічним діям.
5. При утворенні гострих кутів, країв під час анізотропного травлення їх необхідно округлити наступним ізотропним травленням.
6. Щоб уникнути безпосередніх механічних контактів з Si, варто наносити міцні, тверді, корозійностійкі тонкоплівкові покриття SiC або Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> методом хімічного парофазного осадження.
7. Низькотемпературні ТП, наприклад плазмове окислювання, хімічне парофазне осадження при виготовленні мікромеханічних елементів, до-

звolyають уникнути напружень, викликаних термічною неузгодженістю різних легованих, осаджених шарів і кремнію [5, 6].

MEMS-технологія виготовлення оптичних дзеркал передбачає нанесення, частіше за все на кремнієву основу (в яку можуть бути додані метали в малих кількостях для додання певних властивостей), як правило, – металічних покриттів.

## Висновки

В комунікаційних мережах та радіоелектронній техніці оптичні перемикачі є одними з ключових пристроїв, оскільки вони відіграють особливу роль у контролі, моніторинзі, захисті, управлінні та інших функціях.

Використання MEMS-оптичних перемикачів є альтернативним підходом до мініатюризації і поліпшення характеристик апаратури зв'язку, що обумовлює актуальність дослідження можливостей їх застосування і поліпшення існуючих характеристик.

Для отримання виробів з високоточними заданими електрофізичними та оптичними параметрами, безвідмовною, довгостроковою, стабільною, коректною роботою в часі, а також високою надійністю окремих компонентів і вузлів необхідні високоточний контроль якості функціональних відбиваючих покриттів для MEMS-оптичних перемикачів, мінімізація часу перебування їх в безвакуумному середовищі зі створенням спеціального технологічного мікроклімату, використання герметичного обладнання для транспортування та складальних операцій, ретельне очищення виробів від забруднень та високоточне полірування на всіх технологічних етапах виробництва та технологічного, операційного, приймального, суцільного, вимірювального контролю та комплексу організаційно-технічних заходів, спрямованих на забезпечення виробництва продукції із заданим рівнем якості у заданих обсягах.

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ДЕФЕКТЫ ПРОИЗВОДСТВА КРЕМНИЕВЫХ ПОДЛОЖЕК ДЛЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ОТРАЖАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ МОЕМС-ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ

А.И. Филипенко, Е.А. Чалая, М.И. Видешин

*В статье рассмотрены основные дефекты и способы их минимизации, возникающие при производстве кремниевых подложек, используемых в качестве функциональных отражающих поверхностей для МОЕМС-переключателей и непосредственно влияющие на качество оптических зеркал и вносимые потери в оптическую систему в целом*

**Ключевые слова:** микрооптоэлектромеханические компоненты, оптические переключатели, оптические зеркала, технологи производства, кремний, технологические покрытия, потери, кривизна оптических поверхностей, технологические дефекты, искажение сигнала, технологический контроль.

## TECHNOLOGICAL DEFECTS OF SILICON SUB-FILM PRODUCTION FOR THE FUNCTIONAL REFLECTIVE SURFACES OF MOMES-SWITCHES

O.I. Filipenko, O.O. Chala, M.I. Videshyn

*In the article the main defects and how to minimize them, resulting in the production of silicon wafers, which are used as functional surfaces for reflecting MOEMS switches and directly affect the quality of mirrors and optical insertion loss of the optical system as a whole.*

**Keywords:** mikrooptoelektromehanični komponenty, optical switches, optical mirrors, technology, manufacturing technology, silicon, loss, curvature of the optical surfaces, technological defects, signal distortion, technological control.

## Список літератури

1. MEMS in Optical Networks [Electronic resource] Режим доступу: <http://www.allaboutmems.com/memsapplications-optical.html>. Title screen.

2. Невлюдов И.Ш., Палагин В.А., Чалая Е.А. «Технологии микросистемной техники», НТЖ «Технология приборостроения». – X., 2014. – № 3.

3. Невлюдов И.Ш., Палагин В.А., Чалая Е.А. «Технологии микросистемной техники (часть II)», НТЖ «Технология приборостроения». – X., 2015. №2.

4. Петерсен, К. Э. Кремний как механический материал [Текст]/ К.Э. Петерсен // ТИИЭИР. – Т. 70, № 5. – 1982. – С. 5-49.

5. Семенець, В. Введення в мікросистемну техніку та нанотехнології [Текст]/ В. В. Семенець, І. Ш. Невлюдов, В. А. Палагін / Харків «Комп. СМТ», 2011. – 416 с.

6. Мікросистемна техніка та нанотехнології [Текст]: монографія/ І. Ш. Невлюдов, В. А. Палагін, / Київ НАУ, 2017. – 528 с.

7. Чалая Е.А., Влияние поляризационных эффектов на характеристики оптических переключателей [Текст]: Матеріали Всеукраїнської науково-практичної Internet-конференції «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології у виробництві та світі: стан, досягнення, перспективи розвитку», м. Черкаси., 2015. – С. 49 – 51.

8. Филипенко О.І., Чала О.О. Конструктивно-технологічні фактори втрат в оптичних перемикачах на основі МОЕМС-компонентів, Міжнародна науково-практична конференція «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи», 10-16 березня 2014 року, Київ, Україна.

9. Чалая Е.А. Потери в оптических микрзеркалах [Текст]: Матеріали 19-го Міжнародного молодіжного форуму «Радіоелектроніка та молодь в XXI сторіччі», Міжнародна конференція «Автоматизовані системи та комп'ютеризовані технології радіоелектронного приладобудування», Том 2, 20-22 квітня, 2015 року, Харків, Україна.

Надійшла до редколегії 8.02.2017

**Рецензент:** д-р фіз.-мат. наук, проф. І.М. Бондаренко, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків.