

КЛАСИФІКАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЙ МІКРОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

Невлюдов І. Ш.¹, Свищ В. М.², Палагін В. А.¹

1 – Харківський національний університет радіоелектроніки

2 – НВО „Комунар”, СКТБ „Полісвіт”

60066, Харків, пр. Леніна 14, каф. технології та автоматизації виробництва РЕЗ та
ЕОЗ, тел.. (057)702-14-86

E-mail: tapr@kture.kharkov.ua

Technologies “up-down”, that use common semiconductor CMOS-processes for production 2D- and 3D-structures, contenting microelectronic and micromechanical devices; technology of microfibre ceramic plate with insulator, conductor, magnetic, semiconductor fibres, which are integrated in a single device; anodic and direct wafer bonding and thermocompression with intermediate layer; different methods of mechanical formative and corpuscular-photonic processes; biotechnologies with using parts of biological objects in technical aims; technology “down-up” of chemical syntheses and self-assembly properties, nanotechnology, biological technology of artificial building DNA-structures with mechanisms of growth, identification and replication, etc. are used for manufacturing MEMS.

Розвиток мікроелектромеханічних систем (МЕМС) та нанотехнологій (НТ) визначає шляхи науково – технічного розвитку у ХХІ столітті. Хоч такі системи відомі більше 50 років, тільки 10 – 15 років тому почалося масове виготовлення деяких МЕМС – сенсорів і їх широке застосування в автомобільній техніці. Зважаючи на надзвичайну перспективність та важливість робіт цього напрямку для військової техніки, промисловості, науки, медицини, побуту людини, вивчення та захисту навколишнього середовища у багатьох технічно розвинених країнах він визнаний пріоритетним, створені довгострокові програми та виділяються значні державні кошти на роботу у галузі МЕМС та НТ.

Існує ряд близьких за значенням, але не тотожних, термінів, що визначають об’єкти МЕМС а саме: MEMS, MOEMS, MST, systems in chip (або МЕМС, МОЕМС, МСТ, системи на кристалі – мікро – (опто) – електромеханічні системи, мікросистемна техніка).

Автори згодні з аналітичними матеріалами [1], у яких відстоюється думка про необхідність сумісного розгляду НТ та мікро - й наноелектромеханіки (НЕМС) тому, що об’єднання інтелектуальних можливостей електроніки та роботизованих пристроїв, оснащених сенсорами та придатних рухатись, діяти на навколишнє середовище та спілкуватись, виводить людство на зовсім новий етап свого розвитку. Крім того, розвиток кожної НТ і МЕМС зумовлені досягненнями другої.

Серед численних публікацій по МЕМС та НТ є ряд спроб впорядкування термінології за конструктивними рішеннями, функціональною складністю та технологічними засобами їх виготовлення [2-4].

Метою нашого аналізу є виявлення особливостей різних технологічних процесів, для вибору об’єктів, їх конструктивно – технічних рішень, об’єднання можливостей, зусиль і технічних засобів різних розробників та виробників для створення МЕМС.

За лінійними розмірами компонентів виробу різного ступеня мініатюризації прийнято поділяти наступним чином :

Електромеханіка та мехатроніка	>1мм;
МЕМС, МОЕМС, МСТ	-1..1000 мкм;
НТ, НЕМС	-1..1000 нм.

Відомо, що всі атоми мають розміри порядку 0,1 нм, а найбільший діаметр у урані ~ 0,22 нм. Середня відстань між атомами у молекулах порядку 0,15 нм . Наноструктури знаходяться на злитті (або розділі на шкалі розмірів) найменших із створених людиною пристроїв і найбільших молекул живих організмів. МЕМС та НЕМС розглядають усі

властивості структур у мікро - та наномасштабі незалежно від того, якими вони є : хімічними, фізичними, біологічними, квантово – механічними.

У загальному випадку можна виділити такі складові МСТ: джерела енергії та передачі руху – активатори (актуатори), електронні схеми (мікроконтролери, мікропроцесори), сенсори (перетворювачі фізичних величин), об'ємні мікроелектрорадіоелементи із змінними параметрами, системи внутрішніх міжз'єднань та телекомунікаційних зв'язків. Кожна підсистема може використовувати для свого функціонування різні ефекти (електромагнітні, оптичні, механічні, молекулярно – квантові, мезаскопічні, хімічні, біохімічні, біологічні). В цілому МСТ – це інтелектуальні пристрої, які реалізуються на основі універсальних мікросхем (мікропроцесори, пам'ять, АЦП, ЦАП, ОУ та інші), на основі мікросхем, що програмуються споживачем (ПЛМ, ПЛІС, ППЗУ), на основі БМК, що програмуються виготовлювачем мікросхем, на основі замовних мікросхем, розроблених спеціально для конкретних пристроїв. Основною ідеєю розвитку проектування замовних мікросхем є використання в проекті готових складно - функціональних СФ – блоків або ІР – блоків.

Щодо чіткого визначення МСТ у сучасному розумінні слід навести формулювання В. В. Лучиніна з доповненням авторів (у скобках):

„Мікросистемна техніка – це науково – технічний напрямок, метою якого є створення в обмеженому об'ємі твердого тіла або на його поверхні мікросхем, (пристроїв функціональної електроніки та механізмів мікромеханіки) у вигляді впорядкованих композицій областей з заданими властивостями, структурою, геометрією (та зв'язків між ними), статична або динамічна сукупність яких забезпечує реалізацію процесів генерації, перетворення, передачі енергії та руху в інтеграції з процесами сприймання, (вимірювання) й обробки, трансляції, зберігання інформації (та спілкування) при виконанні запрограмованих операцій та дій у визначених умовах експлуатації з необхідними функціональними, часовими та надійнісними показниками.”

Оскільки в технологіях МЕМС порівняно з мікроелектронними виробами новими елементами є мікромініатюрні рухомі механічні деталі та вузли перелічимо найбільш вживані з них. Це – балки, голки – зонди, гіроскопи, двигуни, дзеркала, дисплеї, дозатори, затискувачі, зубчаті колеса та передачі, кабелі, консолі, лінзи, мембрани, мікроманіпулятори, мікророботи, модулятори, оптоз'єднувачі та комутатори, пінцети, підшипники, полоскові лінії, позиціонери, поршні, пружини, резонатори, сенсори фізичних величин, транспортери, фільтри, хвилеводи та інші. Для виготовлення об'ємних мікро механічних деталей та вузлів використовуються такі методи:

вдосконалені варіанти традиційної напівпровідникової КМОП-технології на кристалах кремнію, пристосовані для 3D – структур; індивідуальна мікрообробка фрезеруванням, електроерозійна, алмазна; методи формування (мікроліття під тиском, штампування, спечення; корпускулярно – фотонне формоутворення (КФТП) (лазерне осадження з газової фази – LCVD, випарювання, фото- стимулювання полімеризації; обробка сфокусованим іонним променем); 3D – МЕМС термокомпресійне зварювання; нанопаперова літографія, наноімпринтинг; хімічний синтез структур з розпізнаванням, самоорганізацією; створення рухомих компонентів біологічними методами на основі ДНК – структур; використання оболонки вуглецевих нанотрубок та фулереноподібних матеріалів з їх заповненням газами, рідинами чи твердими речовинами.

Серед методів отримання МЕМС перспективними можуть бути лише ті, які придатні до групового виготовлення, самоскладання, самореплікації, розпізнавання, бо тільки ці властивості можуть забезпечити їх масове виготовлення та низькі ціни продукції.

Методи індивідуальної механічної мікрообробки дозволяють отримати мінімальні розміри канавок 8 мкм у деталях з ПММА фрезою діаметром 22 мкм. Використовується у виготовленні рентгенолітографічних масок. Алмазною мікро- обробкою отримують високочисті поверхні в оптиці, виготовленні мікрочіпів $d > 25$ мкм з $R < 0,1$ мкм. Електроерозійна обробка будь – яких електропровідних матеріалів з допусками в декілька мкм та $R < 0,1$ мкм. Надточний серійно застосований електрод має діаметр 30 мкм, дозволяє отримати розріз 50 мкм.

Мікролиття під тиском, штампування та спечення при виготовленні формуючого інструменту за LIGA – технологіями забезпечує групове виготовлення деталей з полімерних матеріалів [4] (поліамідів, полібутилентерефталату, полікарбонату, поліетилену, поліметилметакрилату, поліоксиметилену, поліпропілену, полієфіриду). Гладкі поверхні стінок інструменту забезпечують вийняття литих деталей з матриць, які виготовляються без технологічних нахилів.

При виготовленні керамічних деталей з окису алюмінію, окису цирконію, нітриду кремнію, п'єзокераміки спочатку ллється стрічкова заготовка, потім штампування напівфабрикатів, видалення матеріалу зв'язки та кінцева обробка – спечення. Недоліками технології є висока усадка та шорховатість поверхні.

Існують два напрямки КФТП: локально – стимульоване зростання (осадження або полімеризація) та локально – стимульоване травлення внаслідок дії на матеріал концентрованого потоку енергії (світлових, електронних, іонних променів). Метод обробки індивідуальний. Основними напрямками стимульованого росту 3D – структур складної конфігурації є лазерне стимулювання осадження з газової фази (LCVD) та фотополімеризація. Використовуються криптоно – фторові лазери з $\lambda = 248$ нм. Тривалість імпульсу – десятки долі наносекунд, частота – близько 2 кГц.

Волоконна технологія МЕМС розвинулась з відомої технології мікро - каналних пластин. До 60 – 70 % (навіть 90 %) площі полімерних чи скляних структур складають ідентичні циліндричні канали діаметром від одиниць до десятків мікрометрів. Отримані пластини навіть з діаметром каналів та товщиною стінок між ними ~33 нм. При цьому щільність отворів складає $3 \cdot 10^{10}$ см⁻². Канали структури можуть бути заповнені різними матеріалами (полімерами, металами, напівпровідниками тощо).

Суть волоконної технології у перетягуванні пучка щільно спечених волокон через філь'ери. Волокна виготовлені з двох марок скла, які відрізняються одне від одного розчинністю у водному розчині HCL. Масштаб перетягування не перевищує 1 : 20 і може повторюватись багаторазово.

Технологія волоконних МЕМС може забезпечити: в одному циклі перетягування геометрично подібних мікроструктур з безліччю типорозмірів волокон; можливість інтегрального і групового виготовлення виробів одночасно; перетягнутому пучку можливо придати складну 3D – геометрію.

За цією технологією можуть виконуватись електродвигуни, літаючі апарати, сонячні батареї та багато інших мікроструктур з високим відношенням об'єму отворів до загального об'єму конструкції.

Крім того, волоконна технологія не вимагає виробничих приміщень із контрольованим мікрокліматом, не потребує спеціалістів високої кваліфікації.

Існують три методи термокомпресійного зварювання кремнієвих пластин для виготовлення 3D – МЕМС:

- анодна термокомпресія – процес взаємної приповерхневої міграції часток пластин кремнію та пірексу (бороспінатного скла з 3,5 % вмісту натрію) під дією прикладеної електричної напруги та механічного тиску;

- пряма термокомпресія – спечення двох щільно з'єднаних кремнієвих пластин, одна з яких має гідрофільну, а друга гідрофобну поверхні, що забезпечує гарний контакт перед високотемпературним спеченням (1000 °C);

- термокомпресія з проміжним шаром у вигляді евтектики низькотемпературного скла (плавлення при 363 °C при вмісті у евтектиці 2,85 % - Si та 97,15 % - Au).

При застосуванні термокомпресійного зварювання необхідно аналізувати сумісність процесу з серійною технологією виготовлення НВІС.

Цей метод відкриває можливості виготовлення гібридних МЕМС та корпусів готових виробів.

Усі вищеописані методи, які згадувалися, відносяться до технології «зверху - вниз», а також ще до «сухих технологій» у протилежність хімічним, біохімічним та біо-

логічним, які створюють компоненти, починаючи з атомно – молекулярного рівня і класифікуються як технології «знизу - вгору» та «мокрі технології». Такий поділ умовний, доля процесів «знизу - вгору» буде постійно збільшуватись, зважаючи на велику увагу до молекулярних та нанотехнологій, у яких вирішальне значення мають процеси хімічного, біохімічного синтезу, самоскладання, біологічні процеси само- розпізнавання, самоорганізації, самореплікації, направленої інформаційно – хімічного синтезу.

Роботи за напрямком МЕМС та НТ спираються переважно на нові матеріали. Найбільш вживані групи матеріалів: напівпровідникові, полімерні в тому числі фоторефрактивні, вуглець (вуглецеві нанотрубки, фулерени та фулерекоподібні), фотонні кристали (опалові), нанопористі кераміки з самоорганізацією, та біокераміки, скло, магнітні нанорідини, нуклеїнові кислоти (ДНК), молекулярні мікроструктури.

Особливу групу складають так звані інтелектуальні матеріали, тобто такі, що реагують тільки на певні умови, або розділяються на складові, з яких створений матеріал. Ці матеріали здатні розрізняти, розділяти, придатні до самовідновлення, самоскладання, самореплікації. Їх властивості дозволяють отримати надчутливі сенсори багатьох фізичних величин та забезпечити масове виготовлення МЕМС за низькими цінами.

Характерними властивостями структур нанорозмірів є значно більший вплив поверхневих (гетерогенних) процесів порівняно з масивними матеріалами, дія молекулярно – квантових ефектів (хвильової природи та дискретизації рівнів).

Створення нових матеріалів є динамічною галуззю науково – технічного прогресу. Тільки за останні 70 – 80 років хіміками синтезовано кілька сот різних наноб'єктів, часток, матеріалів, структур. Це – фулерени, фумароїди, нанотрубки, велетенські кластери, кентаври, коацерати, тактоїди, фазоїди, алафени, тощо. Нові матеріали найшвидше знаходять споживача, втілюються в конкурентоспроможні товари.

Серед МЕМС до масового виробництва доведені ряд сенсорів: акселерометри, що керують подушками безпеки автомобілів, датчики тиску в системах подачі палива. Існують можливості розробки і попиту на мініатюрні сенсори багатьох інших фізичних величин, хімічних речовин (в тому числі ядовитих, вибухових), радіації та полів.

Використання нових фізичних ефектів та властивостей інтелектуальних матеріалів може забезпечити швидкий прогрес у сфері датчиків. Цей напрямок, безумовно, перспективний.

Прогрес МЕМС та НТ визначається головним чином розвитком методів формування мікрооб'єктів, а також дослідженнями за допомогою сучасних приладів з атомною розрізняючою здатністю властивостей МЕМС-структур: растровими електронними, тунелюючими скануючими та атомними мікроскопами.

Нарешті, роботи по створенню МЕМС та НЕМС потребують значних коштів та об'єднання зусиль спеціалістів в різних напрямках. Для чого необхідна розробка як Державної програми розвитку робіт, так і об'єднання зусиль наукових колективів регіонів і співробітництво з іншими країнами.

Література

1. Перспективы развития нанoeлектронных и микромеханических систем. (Коллектив авторов НИИ Физических Проблем им. Ф. В. Лукина). «Электронная промышленность». 2004, №3 с. 22 – 29.
2. П. П. Мальцев. О классификации в области микросистемной техники. «Нано - и микросистемная техника». 2005, №1, с. 9 – 10.
3. В. Д. Вернер, П. П. Мальцев, А. Н. Сауров, Ю. А. Чаплыгин. Технологии миниатюризации «сверху - вниз» или «снизу - вверх» «Нано - и МСТ». 2005, №1, с. 5 - 9.
4. В. Я. Шевченко (акад. РАН). О терминологии: наночастицы, наносистемы, нанокompозиты, нанотехнологии. «МСТ». 2004, №9, с. 2 – 4.
5. Е. В. Шалобаев, Ю. С. Монахов, В. Е. Странсинский, С. А. Шилько. Технология изготовления зубчатых колёс и передач для МЕМС. Технологии индивидуального формoобразования микромеханики. «МСТ». 2004, №8, с. 24 -28.