

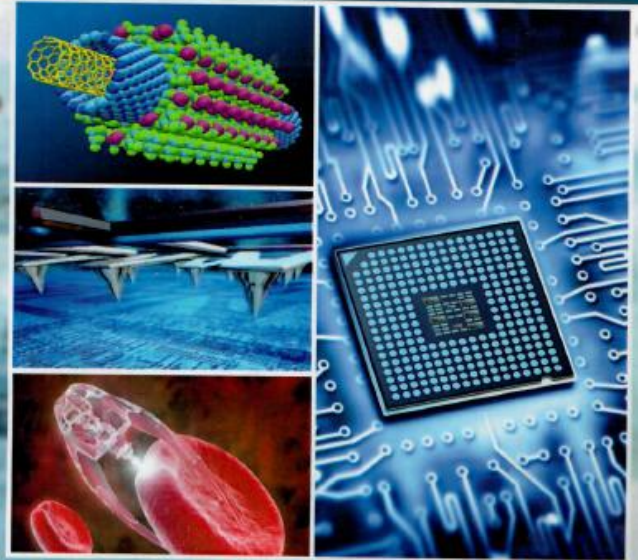
І. Ш. Невлюдов
В. А. Палагін

І. Ш. Невлюдов, В. А. Палагін

МІКРОСИСТЕМНА ТЕХНІКА
ТА
НАНОТЕХНОЛОГІЇ

МІКРОСИСТЕМНА ТЕХНІКА
ТА
НАНОТЕХНОЛОГІЇ

KITAM



Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

І.Ш. Невлюдов, В.А. Палагін

МІКРОСИСТЕМНА ТЕХНІКА ТА НАНОТЕХНОЛОГІЇ

МОНОГРАФІЯ

Київ
НАУ
2017

Рецензенти:

Кортунов В.І. доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри виробництва радіоелектронних систем літальних апаратів. Національний аерокосмічний університет імені М.С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»;

Панченко О.Ю. доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри проектування та експлуатації електронних апаратів. Харківський національний університет радіоелектроніки.

Рекомендовано Вченою радою Харківського національного університету радіоелектроніки (протокол № 10 від 1 липня 2016 року).

Невлюдов І.Ш. Заслужений діяч науки і техніки України, Лауреат Державної премії в галузі науки і техніки України, доктор технічних наук, професор. Харківський національний університет радіоелектроніки завідувач кафедри технології та автоматизації виробництва радіоелектронних та електронно-обчислювальних засобів...

Н 40

Палагін В.А. Лауреат Державної премії в галузі науки і техніки України. доктор технічних наук, професор. Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри технології та автоматизації виробництва радіоелектронних та електронно-обчислювальних засобів.

Мікросистемна техніка та нанотехнології [Текст]: монографія /І.Ш. Невлюдов, В.А. Палагін. ВИДАННЯ., 2017 р. - 528 с.

ISBN 980-969-578-256-8

Викладено принципи створення МЕМС на основі теорії подібностей, розмірностей фізичних величин, електромеханічних аналогій та конвергенції різних фізико-хімічних феноменів, відомості про технології їх виробництва, що дозволяють на єдиній кремнієвій підкладці виготовити мікромеханічні вузли та деталі, а також електронні системи обробки інформації та системи керування. Розглянуто масштабні та квантово-механічні ефекти, що проявляються в мікронному та нанорозмірному діапазонах і забезпечують поліпшення електрофізичних та експлуатаційних характеристик виробів; можливості створення нових матеріалів із формуванням їхніх властивостей на атомно-молекулярному рівні, у тому числі інтелектуальних матеріалів; математичні моделі для проектування чутливих елементів датчиків, балок, мембран, зустрічно-штирьових резонансних систем та ін. Наведені відомості про конструктивні та технологічні рішення формування та самоскладання наноструктур, про інструментальні методи вивчення нанооб'єктів, технологічне обладнання, що використовується у виробництві.

Для фахівців промисловості, пов'язаних з розробкою, виробництвом та експлуатацією нової техніки. Може бути корисним магістрантам, аспірантам, а також студентам вишів.

ББК 32.844.1+30.600.3

ISBN 980-969-578-256-8

І. Ш. Невлюдов
В.А. Палагін. 2017

ПЕРЕДМОВА

XXI століття буде відзначене великою кількістю технічних досягнень, серед яких пріоритетними, революційними, проривними в усьому світі будуть мікроелектромеханічні системи та нанотехнології.

Розвиваючись на основі колишніх наукових і технічних рішень, мікросистемна техніка (МСТ) та нанотехнології (НТ) дозволять підняти на більш високий рівень багато галузей виробництва, матеріалознавство, медицину, освіту, соціальну сферу, військову справу та ін. Перспективність МСТ та НТ доведена цілим рядом виробів, уже реалізованих у мікроелектромеханічному виконанні. Поряд з істотним підвищенням технічних характеристик на кілька порядків поліпшуються габаритно-масові показники, надійність, знижуються матеріаломісткість, вартість. Таким чином, у цілому можна вважати, що мікромініатюризація з використанням електромеханічних систем та НТ забезпечує високу техніко-економічну ефективність і за оцінками фахівців багатьох країн світу буде визначати науково-технічний потенціал та пріоритет держав у світовому співтоваристві.

Розуміючи це, багато країн мають державні програми розвитку мікросистемної техніки та нанотехнологій. Перша державна програма з нанотехнологій, у якій проекту був наданий статус національного та стратегічного, прийнята в Німеччині (1998). Німеччина дотепер залишається першою в багатьох нанотехнологічних напрямках робіт.

У 2000 р. США прийняли довгострокову програму по розвитку нанотехнологій («Національна нанотехнологічна ініціатива») з державним фінансуванням у 3,4 млрд доларів щорічно.

Аналогічна програма розроблена в Росії (2006). В 2007 р. прийнятий федеральний закон, по якому, зокрема, організовано державн корпорацію нанотехнологій «Роснано». У Росії підготовка кадрів для наноіндустрії та мікросистемної техніки з фінансуванням від «Роснано» доручена провідним навчальним закладам: Московському інженерно-фізичному інституту, Московсь-

кому інституту сталі та сплавів. На хімічних факультетах МГУ створений науково-організаційний центр з наноматеріалів та нанотехнологій разом з Курчатовським інститутом. Центр забезпечив високу концентрацію унікального лабораторного обладнання та розробку сучасних навчальних програм.

У НАНУ реалізується програма з обсягом фінансування 30 млн грн на рік (2007). Визнано ряд серйозних досягнень українських учених в області біохімії, колоїдної хімії, матеріалознавства, медицини, фізичної хімії та хімічної фізики, що традиційно працюють із мікро- та нанооб'єктами. Матеріали з пам'яттю форми, нанопорошки оксидів елементів четвертої групи, нанопокриття та елементи сонячних батарей, надпровідникові матеріали, пориста кераміка отримані Донецьким фізико-технічним інститутом ім. А.М. Галкіна НАНУ. Розробляються матеріали для цільової доставки медикаментів по кровоносній системі людини (Інститут експериментальної патології, онкології та радіології ім. Р.Є. Кавецького), лікарські носії, протиопікові високоефективні мазі, наноматеріали, технологія переробки автомобільних шин у «нафту» з високим вмістом легких фракцій (Інститут проблем матеріалознавства НАНУ, м. Київ), монокристали сцинтиляційних та ін. речовин, розроблена технологія використання для готування кераміки оксидних нанопорошків, що мають підвищену хімічну активність та високий ступінь дисперсності, що істотно знижує температуру спікання кераміки (Інститут монокристалів НАНУ, м. Харків), досліджений вплив вуглецевих нанотрубок на організм, метод водного розчинення ВНТ (1995) (Інститут терапії АМН, м. Харків), ВНТ, органічні та неорганічні хімічні матеріали (ХНУ ім. Каразіна, м. Харків), каталітичний крекінг нафти з використанням цеолітів з української сировини (Інститут біоорганічної хімії й нафтохімії НАНУ, г. Київ), нанопокриття (Харківський фізико-технічний інститут), мікрокабелі й елементи сонячних батарей (НДТІ Приладобудування, м. Харків), тунелюючі скануючі мікроскопи (ДНВО «Комунар», м. Харків), електронно-променеві методи нанесення термо-, зносо-, корозійностійких нанопокриттів, технологічного

обладнання – EB – PVD (electronic – beam process vapor deposition) (Інститут електрозварювання ім. Е. О. Патона НАНУ, м. Київ). Інженери Полтавського алмазного заводу ще до 1990 р. вміли одержувати алмазні нанопорошки за допомогою вибуху.

По тематиці МЕМС та НТ ведуться роботи у ряді університетів України, почато роботи з підготовки фахівців МСТ та НТ.

Для забезпечення розвитку мікросистемної техніки та нанотехнологій особливу увагу слід звернути на підготовку кадрів, організацію технопарків, оснащених сучасними науково-аналітичними приладами, на створення науково-виробничих фірм та взаємодію університетської науки, приватних фірм і державних підприємств, а також на необхідність довгострокового державного фінансування науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт.

У цій монографії розглянуто основні принципи створення мікроелектромеханічних пристроїв, функціональний склад та конструктивно-технологічні рішення великого числа МЕМС – пристроїв, розрахунки чутливих елементів різного виду сенсорів, наведено класифікацію технологічних процесів, що використовуються в їхньому виробництві, особливості структур нанодіапазону, принцип електромеханічних аналогій, ефекти зміни масштабу, що проявляються в МСТ, а також квантово-механічні ефекти, що діють у діапазоні 1-100 нм, науково-аналітичні прилади для досліджень наноструктур, методи формування малюнка та структур приладів, принципи, що використовуються при складанні наноструктур, основні групи матеріалів, які застосовують у МЕМС та НТ, області використання та перспективи розвитку МЕМС та НЕМС.

МСТ та НТ є результатом використання великої кількості фундаментальних наук, тобто являють собою синтетичну науку, що використовує теорії різних розділів фізики, хімії, термодинаміки, електротехніки та електроніки, математики та біології, медицини та військової техніки, стосовно до завдань одержання матеріалів із властивостями, що прогножуються, їхнього формування на атомно-молекулярному рівні, синтезу структур нано- і

мікророзмірного діапазону, створення мікромініатюрних пристроїв, приладів та систем різного призначення.

Таке складне об'єднання компонентів різної природи в одному пристрої, системі призводить до накладення однотипних термінів, що використовуються в монографії, та до необхідності уточнення їхніх зв'язків, співвідношень і вибору однакових символів для їхнього позначення. Так, терміни жорсткості, пружності, що використовують в опорі матеріалів та механіці, та модулі жорсткості, пружності, піддатливості – у теорії пружності, фізиці твердого тіла вимагають зіставлення; символи, що позначають кінематичну та динамічну в'язкість, неоднакові в різних літературних джерелах. Для визначення єдиних позначень у монографії введено список використаних символів, перелік скорочень і визначення ряду термінів, що зустрічаються в тексті, а також алфавітний предметний покажчик.

Посилання на використані літературні джерела наведені в тексті за прізвищами першого автора та року публікації роботи.

Рисунки, таблиці та формули пронумеровані за главами та в порядку їхньої появи в тексті, крім кольорових рисунків, які винесені в окремий додаток наприкінці книги.

Наприкінці кожної глави наведені запитання та завдання для перевірки засвоєння матеріалу.

Додаток 6 наведено за навчальним посібником [Лисенко, 2005], додаток 7 – за роботою [Пул, 2007], які рекомендовані як навчальні посібники для ВНЗ Росії. Розділи 2.2-2.3 підготовані к.т.н. Харенком К.Ю.

Дана робота має на меті заповнити один із пробілів освоєння цього виду техніки – відсутність технічних матеріалів для підготовки фахівців в області мікросистемної техніки та нанотехнологій.

Книга може бути корисною для фахівців у галузях конструювання та технології виробництва РЕА, фахівців, зв'язаних з експлуатацією нової техніки, а також для магістрантів, аспірантів, керівників промисловості.

ВСТУП

Об'єднання механічних та електричних (електронних) частин у єдину систему було плідним рішенням у техніці, відомій за назвою електромеханіка. У міру розвитку цього напрямку (мініатюризації електронних систем керування та включення до складу систем інформаційної частини – сенсорів та програмного забезпечення) вона перетворилася в мехатроніку [Исии, 1988], яка забезпечила істотне підвищення надійності за рахунок автономності підсистем та вузлів пристроїв, передачі ряду функцій від механіки – електроніці або програмному забезпеченню, децентралізації керування, зменшення довжини ліній зв'язку, а також використання інших принципів проектування виробів мехатроніки.

Наступним логічним кроком удосконалення електромеханічних конструкцій та систем стала мікромініатюризація механічних вузлів та деталей. У сучасних розробках – це MEMS, MOEMS, MST, systemsinchip (або MEMC, MOEMC, MCT, системи на кристалі), мікро-, опто-, електромеханічні системи, мікросистемна техніка, мікротехніка, мікромеханіка, мікроприладобудування, мікротроніка. Всі перераховані назви – близькі за змістом визначення однієї і тієї ж техніки, але в строгому визначенні не тотожні. Найбільш загальним з них є MCT, що має на увазі інтеграцію на кристалі мікроелектронних, мікромеханічних пристроїв, інформаційної та вимірювальної підсистем. При цьому в основі розвитку та практичного використання технологій мікросистемної техніки лежать техніко-економічні фактори (очікувані в майбутньому переваги). Відомо, що масове виробництво мікросхем дешеве. У той же час класичні промислові технології (механообробка, лиття, технологія переробки пластмас, фотонно-корпускулярні методи обробки та ін.), використовані при виготовленні традиційних електромеханічних пристроїв, характеризуються різким збільшенням вартості виробництва в міру зниження лінійних розмірів та зростання точності виготовлення деталей механічних систем. Цим і зумовлено

прагнення до виготовлення електронної та механічної частини в єдиному технологічному процесі, що при масовому виробництві значно знизить вартість усього електромеханічного пристрою. Істотно також зниження матеріалоємності, габаритно-масових характеристик, енергоспоживання, підвищення надійності виробів МЕМС.

«Класичні» вироби МСТ повинні забезпечувати мінімальні габаритно-масові характеристики (ГМХ), низьке енергоспоживання, мінімальну вартість, високу надійність та стабільність параметрів, масовість виробництва та широку номенклатуру модифікацій.

Досить чітким визначенням МСТ у сучасному розумінні можна вважати формулювання В.В. Лучиніна з доповненнями авторів (у дужках):

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

Існують аналітичні матеріали, що відстоюють необхідність спільного розгляду мікро- та наноелектромеханіки [Пул, 2007], тому що об'єднання мікромеханічних рухливих та чутливих елементів із електронними схемами обробки перетворюють технічну систему в інтелектуальну, здатну забезпечити виконання складних функцій для досягнення поставленої людиною мети на основі прийняття рішень, адаптації своїх дій до умов навколишнього середовища та зовнішніх впливів, оцінки власних можливостей та результатів дій. Крім цього, найчастіше неможливий

поділ або віднесення тих або інших пристроїв до мікро- або нанотехніки. Багато реалізацій квантово-механічних ефектів представляються у формі мікропристроїв; мікромеханічні вузли являють собою вимірювальні або робочі інструменти для нанометрового діапазону (нанометри, позиціонери, зонди ТСМ та АСМ, нанодозатори і т. д.), нанороботи з розмірами мікродіапазону та т. ін. Мікро- та нанороботи, що впливають на зовнішнє середовище, оснащені сенсорами та здатні до переміщення, колективних дій, маніпулювання об'єктами атомного та молекулярного рівня та навіть окремих атомів, створення матеріалів зі спеціальними заздалегідь заданими властивостями, інтелектуальних матеріалів і пристроїв на їхній основі виводять людство на зовсім новий, більш високий етап розвитку. Можливості, створювані МСТ та НТ, дозволять глибше зрозуміти історію, передбачити розвиток цивілізації, Землі та Всесвіту. Ці напрямки доповнюють один одного, сприяють розвитку та виявленню ефектів, недосяжних у роздільних застосуваннях МЕМС та НЕМС, а найчастіше вони просто нерозрізнені, хоча фізико-хімічні процеси та принципи дії пристроїв різних діапазонів розмірів істотно розрізняються.

Основні етапи розвитку МЕМС та НТ:

1905 р. Швейцарський фізик Альберт Ейнштейн опублікував роботу, у якій довів, що розмір молекули цукру становить приблизно 1 нм.

1928 р. Фізик Гамов Г. А. відкрив тунельний ефект, вирішивши рівняння Шредингера, що описують можливість подолання часткою енергетичного бар'єра навіть у випадку, коли енергія частки менша за висоту бар'єра [Ратнер, 2004].

1935 р. Німецькі фізики Макс Кнолл та Ернст Руска створили електронний мікроскоп, що вперше дозволив досліджувати нанооб'єкти.

1958 р. Створені кремнієві вимірювачі напруг.

1959 р. Вчений фізик, лауреат Нобелівської премії Ричард Фейнман на лекції в Каліфорнійському технологічному інституті вимовив знамениту фразу «There's plenty of room at the bottom»

(«Внизу досить місця») та заявив, що, навчившись маніпулювати окремими атомами, людство зможе синтезувати все що завгодно. Привселюдно обіцяв нагороду в тисячу доларів першій людині, що створить електродвигун із розмірами менш ніж 1/64 дюйма.

1961 р. Створено перший кремнієвий датчик тиску.

1967 р. Розроблено поверхневу мікрообробку. Фірма Вестингауз створила резонансний польовий транзистор. Описане використання матеріалу для забезпечення рухливості мікрOMEХАнічних пристроїв із кремнієвої підкладки.

1970 р. Продемонстровано перший кремнієвий акселерометр.

1979 р. Створено перший вузол розпилювача струминного друкувального пристрою.

1981 р. Створення Г. Біннігом та Г. Рорером скануючого тунельного мікроскопа.

1982 р. Датчик кров'яного тиску. «Petersen.K.E. Silicon as Mechanical Material» – наведено основні механічні властивості матеріалу та відомості по травленню кремнію.

1985 р. Відкриття фулеренів, нової форми існування вуглецю в природі (Н. Koroto, J. Health, S. O'Brien). Розроблений LIGA Process, Німеччина, Карлсруе.

1985 р. Американські фізики Роберт Керл, Херольд Крото та Ричард Смол створили технологію, що дозволяє точно вимірювати предмети діаметром в 1 нм.

1986 р. Нанотехнологія стала відома широкому загалу. Американський футуролог Ерік Дрекслер опублікував книгу, у якій передбачив, що нанотехнологія незабаром почне активно розвиватися.

1986 р. Створення атомного силового мікроскопа (Нобелівська премія), що дозволяє взаємодіяти з будь-якими матеріалами, а не тільки із провідниками.

1988 р. Перша міжнародна конференція з МЕМС.

1989 р. Дональд Ейглер, співробітник компанії ІВМ, виклав назву своєї фірми атомами ксенону.

1990 р. Маніпулювання одиничними атомами.

1992 р. Розроблений MUMPS Process за замовленням DARPA, США. Створено перший мікромеханічний шарнір.

1993 р. Створено перший MEMC – акселерометр, виготовлений методом поверхневої мікромашинної обробки (AnalogDevice, ADXL 50).

1994 р. Запатентоване глибоке реактивно-іонне травлення (RIE).

1995 р. Швидко розвилися біо – MEMC.

1998 р. Голландський фізик Сеєз Деккер створив нанотранзистор.

2000 р. Адміністрація США прийняла «Національну нанотехнологічну ініціативу».

2000 р. НАСА розробила великий проект під назвою «Програма розвитку технологій для досліджень у глибокому космосі» та позначенням X2000, у рамках якого, починаючи з 2000 р. кожні два – три роки в космос повинні виводитися ракети з удосконаленим бортовим обладнанням, призначеним для вивчення Сонячної системи та навіть її околиць. Особлива увага приділяється зменшенню розмірів космічних апаратів; для цього постійно знижуються розміри та вага систем авіоніки – авіаційної електроніки, бортового обладнання літальних апаратів (рис. В.1).

У рішенні цього завдання важливу роль повинне зіграти інтегрування мікро- та нанотехнологій.

2000 р. MEMC – компоненти оптоволоконних мереж стали великим бізнесом.

2004 р. Адміністрація США підтримала «Національну наномедичну ініціативу» у якості частини «Національної нанотехнологічної ініціативи».

2010 – 2020 р.р. Проголошено науковою спільнотою десятиріччям вивчення мозку людини.



Рис. В.1. Прогноз розвитку авіоніки

Вже в наші дні відчувається величезний вплив МСТ та НТ на можливості медицини, біології, технічних наук. У ряді країн розгорнуті програми вивчення мозку людини з метою вивчення відповідальності окремих його ділянок за конкретні функції, побудови карти зв'язків нейронів у різних реакціях (конектоміці), розуміння того, як групи нервових клітин беруть участь у складних взаємодіях, з яких створюється велике одне ціле (емерджентність), як з великого обсягу вихідної інформації мозком виробляється конкретне рішення.

Щоб отримати уявлення про емерджентну активність мозку, необхідні нові чутливі сенсори, які дозволяють одночасно реєструвати стан тисячі окремих нейронів. Створенню таких приладів допомагають нанотехнології, які створюють нові матеріали з розмірами молекул. Вже існує прототип матриці, що містить більше 105 електродів, розташованих на кремнієвій підкладці, може реєструвати тисячі нейронів на сітчатці [Черч, 2014].

Існують можливості розробки та потреба в мініатюрних сенсорах багатьох інших фізичних величин, хімічних речовин (у тому числі отруйних, вибухонебезпечних), радіації, електромагнітних полів.

Використання нових фізичних ефектів, властивостей наноматеріалів, зокрема інтелектуальних матеріалів, може забезпечити швидкий прогрес у сфері створення високоінформативних інтегрованих датчиків, а з огляду на низьку вартість та

трудомісткість їхнього масового виготовлення, мікро- та нано-сенсори стануть основою глобальної інформатизації життя суспільства, стану зовнішнього середовища, у тому числі екології, виховання та освіти високоінтелектуального людського суспільства [Бескоровайный, 2005].

За лінійними розмірами компонентів виробу різного ступеня мініатюризації прийнято ділити в такий спосіб [Шевченко, 2004]:

Електромеханіка та мехатроніка (механічні компоненти) > 1 мм.

МЕМС, МОЕМС, МСТ – 1...1000 мкм.

НЕМС (нано- ЕМС), нанотехнології (НТ) – 1,0...100,0 нм.

Атомний масштаб розташований нижче – порядку 0,1 нм (10^{-10} м), ще нижче лежить ядерний масштаб – порядку фемтометра (10^{-15} м).

Відомо, що всі атоми мають розміри порядку 0,1 нм, а найбільший діаметр в урану – $\sim 0,22$ нм. Середня відстань між атомами в молекулах порядку 0,15 нм. Наноструктури перебувають на межі (або розділі на шкалі розмірів) найменших зі створених людиною пристроїв та найбільших молекул живих організмів. МЕМС та НЕМС розглядають всі властивості структур у мікро- та наномасштабах незалежно від того, якими вони є: хімічними, фізичними (електромагнітними, оптичними, квантово – механічними), біохімічними, біологічними.

МСТ та НТ визнані пріоритетними напрямками техніки в ХХІ столітті в багатьох країнах світу: США, Європейський Союз, Японія, Китай, Бразилія, Росія [Иванов, 2004]. Національною нанотехнологічною ініціативою США НТ розглядається як ефективний інструмент, здатний забезпечити лідерство США в першій половині поточного сторіччя, новітні технології цих напрямків є фундаментом науково-технічної революції ХХІ століття, порівнянної та навіть переважаючої за своїми масштабами перетворення, викликані науковими відкриттями ХХ століття. Ці перетворення відбудуться в промисловості та на транспорті, у військовій техніці, медицині, екології, науці та освіті, соціальній

сфері.

МЕМС – виробли відомі більше п'ятдесятьох років, але їхнє промислове виробництво відставало. Тільки 30 років тому ряд сенсорів знайшов широке застосування в автомобільній техніці з обсягами використання по декілька мільйонів штук на рік.

Відомо, що тільки масове виробництво може забезпечити низьку вартість виготовлення виробів. Тому на етапі розробки, виготовлення дослідних зразків важко забезпечити економічну ефективність робіт, необхідна державна підтримка досліджень, створення експериментальної бази та матеріально-технічного виробництва.

У загальному випадку в складі МСТ можна виділити наступні складові на рис. В.2: джерела енергії та передачі руху – активатори (актюатори), електронні підсистеми (системи на кристалі (СНК), мікропроцесори, ЗП, мікроконтролери), сенсори, об'ємні електрорадіоелементи з керованими параметрами, системи внутрішніх між'єднань та телекомунікаційних зв'язків. Кожна система може використовувати для свого функціонування різні ефекти (електромагнітні, оптичні, механічні, молекулярно – квантові, мезаскопічні, хімічні, біохімічні, біологічні). Електронні підсистеми МЕМС – це інтелектуальні пристрої, які реалізуються на базі універсальних мікросхем (СНК, мікропроцесори, пам'ять, АЦП, ЦАП, ОП та ін.), на базі мікросхем, які програмуються виробником мікросхем, а також тих, що програмуються споживачем, та на базі замовлених мікросхем, розроблених спеціально для конкретних пристроїв. Основною ідеєю розвитку проектування замовлених мікросхем є використання в проєкті готових складно-функціональних (СФ) блоків або ІР (intelligent property) – блоків.

Оскільки у технологіях МЕМС у порівнянні з мікроелектронними новими елементами є мікромініатюрні рухливі механічні деталі та вузли, перелічимо найбільш уживані з них. Це – мікроантени, балки, вали, хвилеводи, двигуни, дисплеї, дозатори, затискачі, затвори, дзеркала, зубчасті колеса та передачі, кабелі, кантилевери, консолі, лінзи, мембрани, мікроманіпулято-

ри, мікророботи, оптомодулятори, оптоз'єднувачі та комутатори, пінцети, підшипники, позиціонери, смужкові лінії, поршні, пружини, резонатори, сенсори фізичних величин, столи, струни, транспортери, фільтри та ін.

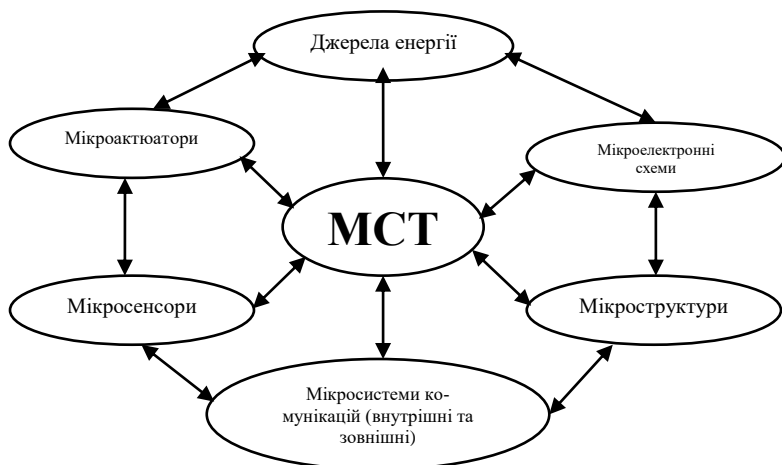


Рис. В.2. Узагальнений склад МСТ

Мікросистемна техніка (МСТ) – є найбільш загальним терміном для визначення виробництва пристроїв, що містять електронні та механічні компоненти з розмірами від одиниць мікрометрів до міліметрів, а також самих цих пристроїв та систем. Можливо, також включення в пристрої оптичних, хімічних, акустичних, гідравлічних, магнітних та інших компонентів з тим самим діапазоном розмірів. МСТ – поліфізична техніка.

Наявність електронних схем у пристроях та системах МСТ вимагає використання на певних етапах виробництва технологічних процесів напівпровідникової техніки. Якщо ТП мікроелектроніки використовується також для виготовлення механічних пристроїв, то це чиста технологія МЕМС; якщо присутні й оптичні (оптико-механічні) компоненти – маємо технологію МОЕМС; з акустичними компонентами – МАЕМС і т. д. Характерною ознакою для технологій цієї групи є виготовлення всіх

видів компонентів, що входять до складу пристроїв, систем, з використанням технологічних процесів мікроелектроніки, які є груповими процесами. Принцип такої класифікації показано на рис. Д8.1, а класифікація може бути продовжена відображенням інших істотних ознак систем (розподілом фізичних процесів на більше число розділів: атомна фізика, теорія газів, рідин, фізика твердого тіла, напівпровідників та ін.; хімічних процесів – на неорганічну, органічну, колоїдну та фізичну хімію і т. д.).

Схему наведено для демонстрації об'єднання різних фундаментальних наук, створення складного, синтетичного напрямку, що змінює глибину пізнання світу; дає людині нові можливості взаємодії з навколишнім середовищем; виводить на більш високий виток розвитку.

Конструктивно виробу МЕМС бажано реалізовувати на єдиній підкладці, тобто напівпровідниковій. Але можливе одержання готових приладів і за гібридною технологією, коли механічні та електричні частини виготовляються на різних підкладках, а потім збираються в єдиний пристрій, наприклад, з використанням термокомпресорного зварювання, що забезпечує з'єднання частин на молекулярному рівні.

Крім мікроелектронних технологій, одержання мікромеханічних деталей, вузлів і виробів у МСТ може бути здійснено й іншими способами. Це мікромеханічні способи [Вернер, 2004] (мікрошліфування, алмазна та мікроерозійна обробка, мікроліття під тиском, штампування, спікання), волоконна технологія [Телець, 2004], корпускулярно-фотонне формоутворення [Нейдриен, 2004], (осадження хімічним випаровуванням з газової фази при низькому тиску – LPCVD, фотостимулювання полімеризації) та ін.

Оскільки мікромеханічна обробка в основному придатна лише для індивідуального виготовлення 3D – механічних елементів, а вартість обробки збільшується при зменшенні розмірів деталей та підвищенні вимог до точності, ці методи придатні для виготовлення формотворного інструмента, а також виробів аерокосмічного та військового призначення, де важливі, насам-

перед, габаритно-масові характеристики, а не вартість. Крім того, звичайні методи мікромеханічної обробки придатні для виготовлення деталей порівняно малої складності.

Технології МЕМС не тільки є способом мініатюризації електронних та механічних компонентів пристроїв або їхнього виготовлення із кремнію, але й представляються парадигмою розробки та створення складних електромеханічних пристроїв з використанням групових методів виготовлення, промислових технологій.

Як промислова технологія МСТ придатна для виготовлення виробів найрізноманітніших галузей промисловості та життєдіяльності людини; дозволяє одержати вироби більш високої якості та надійності при більш низьких ГМХ та вартості; є базою для виробництва ряду виробів, які неможливо одержати іншими методами, наприклад, інструментів і науково-дослідних приладів для нанотехнологій.

Однак існує й безліч труднощів і проблем, які необхідно вирішити, перш ніж МСТ виявить всі свої переваги.

Нанотехнології є більш глобальним у порівнянні із МСТ напрямком, що охоплює всі мислимі сторони життя людини. Створення матеріалів із завданням їхніх властивостей на атомно-молекулярному рівні, синтез будь-яких складних речовин аж до органічних (у майбутньому) живих організмів повністю змінить умови життя людей.

У друге видання монографії внесені такі доповнення:

- застосовано теорію подібностей та розмірностей фізичних величин для пояснення впливу зменшення розмірів елементів на співвідношення діючих у системі сил;
- розглянуто дві системи електромеханічних аналогій в МЕМС («сила – напруга» та «сила – струм»); додані рівняння Лагранжа-Максвелла для аналізу динамічних процесів; вказано шлях аналізу електромеханічних середовищ;
- проведено аналіз фізико-математичних основ мікрмініатюризації компонентів, що входять до складу МСТ, та зроблено висновок, що саме цілеспрямована конвергенція

діючих явищ різної фізичної природи є творчим методом створення компонентів та приладів МСТ;

- наведено перелік особливостей різних фізичних явищ, які можуть використовуватись у МСТ в множинних комбінаціях;
- розглянуто ряд матеріалів, перспективних для застосування в МСТ, зокрема, чорнила (фарби) для струминних друкуючих голівок, перовскіти для елементів сонячних батарей; п'єзокераміка для перетворювачів енергії та п'єзодвигунів;
- показано ефективність створення багатозондових підключаючих пристроїв для електричного контролю багатопроводних друкованих, товстоплівкових та тонкоплівкових плат, а також контролю електричних параметрів компонентів з кульковими виводами типу BGA/CSP з можливістю самотестування кожного зонду множини;
- приклади використання різних технологічних методів для отримання складних 3D – структур, забезпечення точності складання прецизійних структур;
- перспективність застосувань компактних матричних мультидатчиків, зокрема, акустоелектричних.

ЗМІСТ

Передмова.....	3
Перелік скорочень.....	7
Використані символи.....	11
Вступ.....	15
1. Теоретичні основи елементів МЕМС.....	27
1.1. Ефекти масштабу в мікросистемній техніці.....	27
1.2. Електро механічні аналогії.....	45
1.3. Сенсори та актуатори.....	58
1.3.1. Ємнісні чутливі елементи.....	59
1.3.2. Індуктивні чутливі елементи.....	68
1.3.3. Електростатичні перетворювачі.....	71
1.3.4. Напівпровідникові датчики.....	74
1.3.5. Тензорезистивні перетворювачі фізичних величин..	76
1.3.6. Субмікронні магнітні сенсори.....	81
1.3.7. Датчики концентрації газів.....	85
1.3.8. Мікрокабелі на поліімідному носії.....	89
1.3.9. Міжз'єднання та кросбари.....	94
1.3.10. Оптоволоконні позиціонери.....	108
2. Математичні моделі типових елементів МЕМС та система автоматизованого проектування	111
2.1. Математичні моделі балок.....	125
2.2. Математичні моделі мембран.....	141
2.3. Математичні моделі напівпровідникових датчиків.....	155
2.4. Математичні моделі зустрічно-штирових резонаторів.....	166
3. Матеріали для МЕМС та НТ.....	169
3.1. Електричні та механічні властивості кремнію.....	169
3.2. Вуглецеві форми матеріалів.....	180
3.3. Провідникові матеріали.....	195
3.4. Феромагнітні рідини.....	206
3.5. Фотонні кристали.....	209
3.6. Кераміка.....	211
3.7. Полімерні матеріали.....	215
3.8. ДНК.....	218
3.9. Інтелектуальні матеріали.....	220
4. Технології МЕМС.....	223
4.1. Технологія LIGA.....	234
4.2. MUMPS технологія виготовлення мікродвигуна.....	239
4.3. Технологія SUMMIT і SUMMIT-V.....	241

4.4. Особливості травлення монокристалічного кремнію.....	244
4.5 Технологія HARPSS.....	253
5. MEMC прилади.....	258
5.1. Елементи сонячних батарей.....	258
5.2. Гальванічні елементи	278
5.3. Струминні друкуючі головки.....	282
5.4. Паливні елементи.....	286
5.5. Мікрофон – телефон, слухові апарати.....	288
5.6. MEMC проектори зображень.....	289
5.7. Акселерометри.....	290
5.8. Мікрогіроскопи.....	296
5.9. Конденсат Бозе-Ейнштейна.....	304
5.10 П'єзоперетворювачі енергії	307
5.11 Сенсори на поверхневих акустичних хвилях.....	313
6. Міні-, Мікро- та нанороботи.....	317
7. Нанотехнології.....	338
7.1. Наноімпринтинг або нанодруківана літографія	342
7.2. Нанотехнології самоскладання.....	353
7.3. Методи дослідження в нанотехнологіях.....	355
7.4. Біотехнології.....	368
7.5. Нанобіологічні структури.....	373
Висновки.....	384
Перелік посилань.....	390
Словник термінів.....	410
Додатки.....	417
Додаток 1. Періодична система елементів Д.І. Менделєєва.....	417
Додаток 2. Види деформацій механічних елементів. Основні розрахункові формули.....	418
Додаток 3. Фундаментальні константи.....	437
Додаток 4. Тензори однорідних напруг та деформацій 4- го рангу..	441
Додаток 5. Латинський алфавіт. Грецький алфавіт.....	445
Додаток 6. Проектування елементів мікросистемної техніки.....	446
Д 6.1. Мова опису елементів мікросистем VHDL – AMS	446
Д 6.2. Проектування елементів МСТ у САПР Tanner Pro ...	455
Д 6.3. Проектування елементів МСТ у САПР CoventorWare .	461
Д 6.4. Програма кінцево-елементного моделювання ANSYS .	467
Додаток 7. Науково-дослідні прилади для MEMC та НТ.....	471
Додаток 8. Кольорові ілюстрації.....	481
Додаток 9. Технологічне обладнання для виробництва MEMC....	510

Додаток 10. Технологічне обладнання для наноімпринтингу.....	511
Додаток 11. Фундаментальні частинки	516
Предметний покажчик.....	517

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

НЕВЛЮДОВ Ігор Шакирович,

Заслужений діяч науки і техніки України,
Лауреат Державної премії в галузі науки і техніки України,
доктор технічних наук, професор,
Харківський національний університет радіоелектроніки,
завідувач кафедри технології та автоматизації виробництва
радіоелектронних та електронно-обчислювальних засобів.

ПАЛАГІН Віктор Андрійович,

Лауреат Державної премії в галузі науки і техніки України,
доктор технічних наук, професор,
Харківський національний університет радіоелектроніки,
професор кафедри технології та автоматизації виробництва
радіоелектронних та електронно-обчислювальних засобів.

МІКРОСИСТЕМНА ТЕХНІКА ТА НАНОТЕХНОЛОГІЇ

МОНОГРАФІЯ

Коректор В.Г. Рожковська

Комп'ютерна верстка О.О. Ніколаєва

Підписано до друку 14.10.2016 р. Формат 60x84 1/16.
Папір офсет. Гарнітура Таймс. 33,0 Умов. друк. арк.
24,2 Умов. вид. арк. Тираж 300 прим. Зам. № 115.