

# **Функціональні матеріали для високоенергетичної електроніки**

## **Лекція 16**

- **Мікро- і наноелектромеханічні системи. . Матеріали і методи для виготовлення пристроїв за технологіями мікроелектромеханічних систем (MEMS) та наноелектромеханічних систем (NEMS). Застосування MEMS технологій. Нанобіоелектроніка**
- Одним із найбільш перспективних напрямків сучасної мікроелектроніки є так звані мікроелектромеханічні системи (MEMS) (англ. Microelectromechanical systems (MEMS)). MEMS – це технологія точного пристрою, який інтегрує в собі механічні елементи, датчиків, приводів електроніки на кремнієвій підкладці за допомогою мікротехнологій, тобто це технології і пристрої, які об'єднали в собі мікроелектронні та мікромеханічні компоненти (рис. 1). Оскільки MEMS розвиваються на межі різних галузей науки і техніки, то для їх розроблення необхідні фахівці найрізноманітніших галузей знань, які могли б ефективно взаємодіяти. Внаслідок поєднання трьох галузей науки: оптики, електроніки та механіки формуються мікроопто-електронномеханічні системи (МОЕМС).
- Від класичних механічних систем макросвіту пристрої MEMS відрізняються розмірами – матеріали в такому масштабі поведуться трохи інакше, ніж в об'ємному вигляді, хоча мікросистеми ще підкоряються законам класичної фізики, на відміну від наносистем. Типові розміри мікромеханічних елементів лежать в діапазоні від 1 до 100 мкм, тоді як розміри кристала MEMS мікросхеми вже мають розміри від 20 мкм до одного міліметра. Основним завданням мікроелектромеханіки є створення мікроконст-рукцій різного призначення. Основою служать досягнення сучасних мікроелектронних технологій.
- MEMS є тривимірними мікрооб'єктами і мікромашинами: мотори, насоси, турбіни, мікророботи, мікродатчики або цілі аналітичні мікролабораторії, виконані на кремнієвій підкладці. Їх розміри можуть бути меншими сірникової голівки, і тому використання MEMS дозволить різко зменшити масу і об'єм традиційної електронної техніки, а також значно знизити її вартість.

- Різновидом МЕМС є **наноелектромеханічні системи (НЕМС)** (англ. Nanoelectromechanical systems (NEMS)). Їх граничні розміри варіюються від кількох сотень до одиниць нанометрів. Нові фізичні властивості, що з'явилися завдяки малим розмірам, відіграють провідну роль в операціях, що виконуються цими пристроями, тому для їх виготовлення потрібні нові підходи. В даний час можна виділити дві основні тенденції у створенні НЕМС: зменшення розміру існуючих МЕМС та розроблення принципово нових молекулярних двигунів і молекулярних електромеханічних пристроїв. Перший підхід пов'язаний з великими труднощами, оскільки методи, що використовуються для створення МЕМС (електронна літографія, іонне травлення та ін.) мають обмежену роздільну здатність, тому їх проблемно використовувати для створення нанооб'єктів. Як очікується, НЕМС зроблять революцію в галузі метрології, особливо – при вимірюванні надзвичайно малих сил і зсувів на молекулярному рівні. Вже в даний час на основі НЕМС створені нанорезонатори з фундаментальною частотою коливань вище 10 ГГц, що ще не так давно здавалося недосяжним. Такі резонатори вже знайшли застосування як кантилевери скануючої зондової мікроскопії, нановагів і наносенсорів біологічних молекул і ДНК. Іншою очевидною перевагою НЕМС є їх надзвичайно низьке енергоспоживання.
- **До МЕМС відносять:**
  - мініатюрні деталі: гідравлічні й пневмоклапани, струменеві сопла принтерів, пружини для підвіски голівки жорсткого диску;
  - мікроінструменти: скальпелі та пінцети для роботи з об'єктами мікронних розмірів; мікромашини: мотори, насоси, турбіни розмірами з горошину;
  - мікророботи; мікродатчики і виконавчі пристрої.
  - У найзагальнішій формі МЕМС складаються з механічних мікроструктур, мікросенсорів і мікроелектроніки і всі ці компоненти інтегруються на одному кристалі кремнію (рис. 2).

- Як правило МЕМС ділять на два типи: **сенсори** - вимірювальні пристрої, які переводять ті чи інші фізичні впливи в електричний сигнал, і **актюатори** (виконавчі пристрої) - системи, які займаються зворотним завданням, тобто переведенням сигналів у ті чи інші дії.
- **Актюатор** (мікро-, наноактюатор) (складова частина МЕМС) - це пристрій, який перетворює енергію у керований рух, їх розміри від декількох квадратних мікрометрів до одного квадратного сантиметра. Діапазон застосування актюаторів надзвичайно широкий і різний, і він постійно зростає. Вони використовуються в робототехніці, в керу-вальних пристроях, в космічній галузі, в біомедицині, дозиметрії, у вимірювальних приладах, у розважальних технологіях, автомобілебудуванні та в домашньому господарстві.
- Основні методи для отримання активації (рух, деформація, приведення в дію) в таких пристроях можуть бути зведені до таких: електростатичний, магнітний, п'єзоелектричний, гідравлічний і тепловий. Найбільш перспективними методами вважаються п'єзоелектричні та гідравлічні, хоча й інші мають важливе значення.
- **Електростатична активація** застосовується приблизно в третій частині актюаторів, і, ймовірно, це найбільш загальний і добре розроблений метод, його головні недоліки це знос і злипання.
- **Магнітні актюатори**, як правило, вимагають відносно великого електричного струму (тобто багато енергії), також на мікроскопічному рівні при використанні електростатичних методів активації, вихідний сигнал, що отримується, на відносну одиницю розмірності краще, ніж при використанні магнітних методів, тобто при одному і тому самому розмірі електростатичний пристрій видає більш якісний вихідний сигнал.

- **Теплові актюатори** теж споживають відносно велику кількість електричної енергії, і головний їх недолік в тому, що згенероване тепло розсіюється. На цей час розробляються актюатори, що базуються на ефекті пам'яті форми, які можуть бути мініатюризованими до субмікронних розмірів.
- Якщо для вчених створення НЕМС є складним завданням, рішення якої, мабуть, стане справою найближчого майбутнього, природа вже впродовж мільйонів років легко створює різні наномеханічні пристрої. Багато відомих біологічних систем – віруси, бактерії, одноклітинні мікроорганізми та інші – мають різні засоби пристосування, що дозволяють їм переміщуватися залежно від поведінки у довкіллі, в тому числі під дією електричних імпульсів нейронів. Тому одним із актуальних напрямків у сфері створення НЕМС є не розробка принципово нових, а наслідування вже відомим природним молекулярним моторам. Хімічне керування такими наноактюаторами здійснюється за допомогою зміни складу навколишнього середовища, її кислотності та інших факторів. Іноді використовують світло, яке, впливаючи на молекули, приводить актюатор у рух. До хімічних наноактюаторів відносять і так звані біологічні молекулярні мотори.
- При виготовленні та експлуатації МЕМС спостерігається велика кількість особливостей і проблем, обумовлених малими розмірами, – наприклад, проблема сухого тертя, чи небезпека пошкодження (вихід з ладу) через сили поверхневого тяжіння. Тому проектування мікросистем надзвичайно важливий процес.
- З одного боку, сила тертя приводить до втрат, які є причиною погіршення функціонування елементів, з іншого боку, тертя приводить до зносу деталей, що негативно впливає на функціональну поведінку і викликає швидке старіння і, в кінцевому підсумку спричиняє поломку компонентів. Тертя є ключовим фактором, який визначає не тільки ефективність, але і довговічність, однак воно не завжди супроводжується зношуванням, можливо також і тертя без зношування.

- Для мікромоторів як підшипник ковзання використовують підшипники сухого тертя, які, однак, можуть бути забезпечені молекулярними змащувальними плівками для зменшення тертя і зносу. У цьому випадку характеристики мастила і контактної поверхні стають головними чинниками. Характеристики матеріалів для мастильних плівок молекулярної товщини змінюються. Необхідно зауважити, що на сьогоднішній день ще не існує загальноприйнятих методів застосування молекулярних плівок товщиною в кілька нанометрів. У цьому випадку шорсткість поверхні відіграє важливішу роль, ніж товщина плівки, що використовується в мікросистемах, яка має розміри від декількох десятків до декількох сотень нанометрів
- Згідно із статистичними даними розвиток MEMS технологій на 2016 рік буде мати наступний вигляд рис. 3.
- **1. Матеріали і методи для виготовлення MEMS та NEMS пристроїв**
- При створенні мікросистем, фактично, виділяють дві групи матеріалів:
- 1. **Конструкційні** (скло, монокристалічний, полікристалічний, пористий кремній, діоксид та нітрид кремнію, поліамід, вольфрам, нікель, мідь, золото, алмазоподібний вуглець), що використовуються для формування: несучих конструкцій, струмопроводів, мастила.
- 2. **Функціональні** (нікель / титан, пермалой, кварц, оксид цинку, п'єзокераміка, матеріали групи AIIIIV, AIVBVI), що виконують за рахунок електростатичних, електромеханічних, п'єзоелектричних, магнітних, оптичних явищ і ефекту пам'яті форми функції: джерел руху; механізмів передачі руху; сенсорних і активуючих середовищ.
- При створенні мікросистем різного функціонального призначення на основі композицій різних матеріалів повинні враховуватися наступні параметри:
- кристалохімічна сумісність;
- термомеханічна сумісність;

- теплова стійкість (допустиме теплове навантаження, що враховує температуру Дебая, точку Кюрі, а для напівпровідників і температуру переходу в стан, коли концентрація власних носіїв заряду близька до домішкової; здатність речовини віддавати енергію в довкілля за рахунок теплопровідності, а при високих температурах і за рахунок тепловипромінювання);
- електрична стійкість;
- механічна стійкість;
- механічна втома.
- Світовий досвід виготовлення МЕМС заснований на широкому використанні кремнію - дешевого і доступного матеріалу. Однак технологій кремнієвої мікромеханіки і обробки інформації на кремнії (КМОП-схеми), недостатньо для успішного розвитку МЕМС. Тому велике значення мають системи, в яких поряд із кремнієм та іншими напівпровідниковими матеріалами використовуються полімери, кераміка, метали.
- Для виготовлення мікросистем головним чином використовується групова технологія. При використанні подібної технології одночасно обробляється велика кількість елементів, при чому ручне втручання або взагалі не потрібно, або воно незначне, наприклад, осадження плівок, оптична літографія, гальваніка або травлення. Більшість з цих технологій беруть свій розвиток з напівпровідникової технології.
- Мікросистеми мають малі розміри, а тому і витрати на матеріали незначні, а це означає, що виробничі витрати низькі, незважаючи на те, що накладаються особливі вимоги на необхідну чистоту матеріалів. Але вартість заводів з виробництва висока, оскільки виробниче обладнання вимагає дуже високої точності (чисте приміщення, покриття та ін.), крім того, високі витрати вимагають обслуговування і контролю (наприклад, керування виробничим процесом, контроль над нанесенням покриття).

- **Об'ємна мікрообробка** – це виробничий процес, що проходить від поверхні кремнієвої пластини вглиб, при якій хімічним травленням послідовно видаляються непотрібні ділянки кремнію, внаслідок чого залишаються необхідні деталі механізмів. За допомогою фоторезисту на пластині формується рисунок, що захищає ті ділянки, які необхідно зберегти. Потім пластини занурюються в рідкий протравлювач (гідроксид калію), який витравлює зайві ділянки кремнію. Технологія об'ємної мікрообробки відносно проста і недорога, і добре підходить для не дуже складних деталей.
- Практично всі датчики тиску виготовляються сьогодні з використанням об'ємної мікрообробки (рис. 4). Вони перевершують традиційні датчики тиску за своїми параметрами, і є більш дешевими, надійними з гарною відтворюваністю характеристик.
- **Поверхнева мікрообробка** - це виробничий процес, що складається із послідовного нарощування шарів матеріалу на кремній. Щоб створити рухливі, функціонуючі механізми, в шарах чергують тонкі плівки конструкційного матеріалу (як правило це кремній) і заповнювача, який називають абляційним (жертвним) матеріалом (як правило, двоокис кремнію). З конструкційного матеріалу утворюються механічні елементи, а абляційний матеріал заповнює порожнини між ними. На останньому етапі заповнювач видаляється травленням, і конструкційні елементи набувають рухливості і функціональності.
- Поверхнева мікрообробка вимагає більшої кількості технологічних операцій, ніж об'ємна, і відповідно вона дорожча, але її використання дозволяє отримувати більш складні механічні елементи. Цей метод призначений для створення тонких пристроїв (менше 2 мкм), тому на підкладку можна нанести лише тонкі плівки. Цей клас технологічних процесів більш перспективний і поширений для створення датчиків руху (рис. 5).



- LIGA технологія (Lithographie, Galvanoformung, und Abformung) – дозволяє виготовляти 3D-структури в діапазоні від 10 мкм до одиниць міліметрів, а товщина/висота деталей може становити від 10 мкм до одиниць міліметрів (рис. 6), використовуючи різноманітні матеріали – метали, полімери, кераміку, скло. Вона є альтернативою об'ємної та поверхневої мікрообробки, що являє мікроліт-тя, у процесі якого мікроструктура виготовляється з використанням спеціальних масок, для того щоб структурний шар осаджувався лише в тих місцях, де він потрібен, без подальшого травлення.
- Для отримання необхідної деталі потік високопаралель-них рентгенівських променів, що генерується синхротроном, падає на маску з матеріалу, що має підвищену здатність до поглинання рентгенівського випромінювання. Проникаючи крізь відкриті області в масці, рентгенівські промені засвічують фоторезист, нанесений на електропровідну підкладку з металу або металевих сплавів. Засвічені гальваностегії (процес електролітичного осадження) утворюють об'ємні металеві деталі. Після цього потрібно лише видалити залишки фоторезиста, і тривимірні мікродеталі з металу готові.
- Поряд із рентгенівським випромінюванням в технології LIGA використовується також ультрафіолетове. З особливостей цього процесу можна відзначити - керування шириною профілю і сумісність з технологією тонких плівок.
- **MUMPs ((Multi User MEMS Process)** - аббревіатура означає: багатокористувацька MEMS технологія. Це дуже відома комерційна програма, яка надає розробникові рентабельний доступ до поверхневої механічної обробки. MUMPs - це процес тришарової полікристалічної поверхневої мікрообробки, який успішно поєднує в собі основні стадії більш простих процесів. Розроблений на початку 1990-х років в Berkeley Sensor & Actuator Center, Каліфорнійський університет (США). MUMPs -технологія є комерційною програмою, яку підтримує більшість підприємств напівпровідникової промисловості, університетів і лабораторій, що спеціалізуються на розробці і виробництві мікросистемної техніки.

- Недоліком даної технології є неможливість виготовлення елементів МСТ з іншого матеріалу, крім як з полікремнію. Перевагою MUMPs -технології (як і поверхневої мікрообробки) є можливість створення великої кількості різних за функціональним призначенням елементів МСТ в одному процесі виготовлення з незначними змінами, а також можливість інтегрального створення сенсорних і актюаторних елементів на одній підкладці з елементами обробки, передачі і зберігання інформації. Крім того, планарні багаторівневі актюаторні елементи мають більшу функціональність у порівнянні з конструкціями тих же розмірів, створених з використанням об'ємної мікрообробки.
- **Інтегровані МЕМС технології.** Оскільки для створення МЕМС використовується те ж обладнання і ті ж технології, що і для виготовлення інтегральних схем, ніщо не заважає формувати електронні схеми на одному кристалі з мікромеханізмами. Це дозволяє забезпечувати мікромаши-ни інтелектом і створювати різноманітні пристрої.
- Розміри МЕМС деталей залежать від розмірів масок, що використовуються, а для виготовлення останній, найбільш часто, використовуються методи літографії, які мають свої межі роздільної здатності (табл. 1).
- **2. Застосування МЕМС технологій**
- Мікросистемні пристрої сьогодні є частиною вже багатьох продуктів: мікрофони, акселерометри, гіроскопи, дисплеї інтегруються в автомобільні, медичні, телекомунікаційні, промислові та портативні електронні пристрої та ін. (табл. 2).

- У МЕМС датчиках тиску і руху (акселерометрах, гіроскопах) проводиться моделювання процесів, параметри яких вимірюються, мікромеханічною структурою. Ці пристрої не мають рухомих частин, пов'язаних з об'єктом, тому вони класифікуються як безконтактні пристрої. У тому випадку, якщо рухлива структура ретельно спроектована і повністю захищена корпусом датчика, мініатюрні датчики високо надійні і можуть забезпечувати функціональні характеристики в умовах різних середовищ і фазових станах, перепадів температур, вібрацій, ударних хвиль, вологості, забруднень, електромагнітних завад, радіаційного впливу. Причому надійна і точна робота забезпечується не в статичних або квазістатичних, а в динамічних умовах, тобто, що характеризуються швидкими, стрибкоподібними, періодичними, аперіодичними змінами параметрів. Мікродвигуни, радіочастотні перемикачі, радіопередавачі функціонують в аналогічних умовах – з тією різницею, що їх рухлива структура виконує електромеханічні перетворювальні функції.
- На сьогоднішній день найбільш популярні датчики руху, що ґрунтуються на конденсаторному принципі (рис. 7). Рухома частина системи – невеличкий вантаж, що спеціальним чином підвішений. При наявності прискорення вантаж зміщується щодо нерухомої частини акселерометра. Обкладка конденсатора, що прикріплена до вантажу, зміщується відносно обкладки на нерухомої частини. Ємність змінюється, при незмінному заряді змінюється напруга – цю зміну можна виміряти і розрахувати зміщення вантажу. Звідки, знаючи його масу і параметри підвісу, легко знайти і прискорення.
- Крім конденсаторних датчиків, існують МЕМС-акселерометри, базуються на явищі п'єзоелектру. Замість зміщення обкладок конденсатора, в акселерометрах такого типу відбувається тиск вантажу на п'єзокристал. Основний принцип той же, що і в п'єзозапальничках - під впливом деформації п'єзоелемент виробляє струм. Зі значення напруги, знаючи параметри системи, можна знайти силу, з якою вантаж тисне на кристал, - і відповідно розрахувати прискорення.

- Інший пристрій з ряду MEMS технологій - мікроскопічний мікрофон. Такий мікрофон складається із двох мембран, які виступають як пластини конденсатора - тонкої гнучкої і трохи товстішої нерухомої. Під впливом тиску повітря мембрана зміщується, що приводить до зміни ємності між пластинами - при постійному заряді змінюється напруга. Ці дані перелічуються в амплітуді і частоті звукової хвилі. Щоб мінімізувати вплив тиску повітря на нерухому мембрану вона перфорується. Крім того, під нею робиться порівняно велика ніша з обов'язковим вентиляційним отвором. Подібні мікрофони можуть використовуватися як датчики тиску.
- MEMS технології використовуються в струменних принтерах, відповідно до цього існує два методи розпилення чорнила: п'єзоелектричний метод (рис. 8) та метод газових пухирців (рис. 9). Для першого методу характерним є те, що у кожному розпилювачі п'єзоелектричного вузла встановлено плоский п'єзоелемент, що зв'язаний з діафрагмою. Під час друкування він стискає й розтискає діафрагму, викликаючи розпилення чорнил через розпилювач. При попаданні потоку аерозолю на носій, друкується точка (використовується в моделях принтерів фірм Epson, Brother).
- При методі газових пухирців, кожний розпилювач обладнано нагріваючим елементом. Якщо через цей елемент проходить мікросекундний імпульс току, чорнила нагріваються до температури кипіння, і утворюються бульбашки, які витискають чорнила з розпилювача, що утворюють відбитки на носії (використовується в моделях принтерів фірм Hewlett Packard, Canon і Lexmark).
- **Мікроробототехніка** - це спеціалізована область MEMS, яка займається розробкою інтелектуальних мікро-роботів спеціального, в тому числі військового застосування. Конструктивна частина мікророботів виконується на базі технологій MEMS, для збирання використовується спеціальний інструментарій. Для пересування мікророботів застосовуються різні двигуни - п'єзоелектричні, електромеханічні, електромагнітні.

- П'єзомотор складається з тонких керамічних пластин, які згинаються при подачі живлення і повертаються до первісної форми при його відключенні. Подібна технологія застосовується, наприклад, для створення вібрації в телефоні. П'єзомотор дуже ефективний (понад 90 % електроенергії перетворює в механічну).
- «Мозком» робота є спеціальна мікросхема, що керує подачею напруги на п'єзокристал і зчитує показання численних датчиків, встановлених на його тілі. Мікродатчики призначені для отримання інформації про параметри власного руху робота та параметрах зовнішнього середовища (тиск, температура, візуальна інформація, інформація про стан досліджуваних ними об'єктів).
- У медицині використовується хірургічне обладнання: скальпель, керований п'єзоелектричним мікроактюатором, кроковий двигун дозволяє точно керувати його положенням; ультразвуковий різальний інструмент - п'єзоелектричний матеріал приєднується до різучого інструменту для резонансу кінчика пристрою в ультразвуковій частоті. Лише коли пристрій приведено в дію він буде швидко і легко різати навіть жорсткі тканини (наприклад застиглий очний кришталік пацієнта з катарактою) [6].

- **3. Нанобіоелектроніка**

- **Нанобіотехнології** (синонім біонанотехнологій) - розділ нанотехнології, що займається вивченням і впливом об'єктів нанометрових розмірів на біологічні об'єкти і їх використання для розвитку наномедицини, що займається створенням наноліків, діагностичних систем на основі на-ночастинок, розробленням медичних нанороботів і створенням медичних наноматеріалів.
- **Наномедицина** - стеження, виправлення, конструювання та контроль над біологічними системами людини на молекулярному рівні з використанням нанопристроїв і наносистем.

- Виділяють ряд напрямків нанотехнології в біомедицині:
- інженерія живих тканин і регенеративна медицина;
- біологічні наноструктури; інкапсуляція ліків та адресна доставка ліків;
- молекулярна візуалізація; біофотоніка; біосумісні імплантанти;
- біоаналітичні мембрани; молекулярні біосенсори; біочіпи і лабораторії на чіпі (lab-on-a-chip); функціональні молекули: перемикачі, насоси, транспортні засоби.
- **Нанороботоконструювання** - мультидисциплінарна галузь, в якій зосереджені спільні зусилля фізиків, хіміків, біологів, програмістів, інженерів та інших фахівців для отримання позитивних результатів для створення наноро-ботів.
- **Нанороботи або наноботи** - керовані пристрої розмірами з молекулу (в деяких випадках допускається - до мікронних розмірів), складені з нанорозмірних компонентів, що мають функції руху, обробки і передачі інформації, а також виконання програм. При створенні мікророботів використовуються технології MEMS, що складаються з мільярдів атомів, у той час як нанороботи, ймовірно, будуть виготовлятися шляхом складання індивідуальних атомів або молекул. Медичні нанороботи є кібернетичними пристроями на-нометрових розмірів, виготовлених з атомарною точністю. Вони здатні функціонувати в організмі людини, проводячи корекцію молекулярних і клінічних процесів, наприклад, пристрої для контролю рівня глюкози в крові і для вироблення інсуліну.
- Типовий медичний наноробот має мікронні розміри, які дають можливість рухатися по капілярах, і буде виготовлений (на базі сьогоденних поглядів) з високоміцних і хімічно-інертних матеріалів на основі вуглецю і його похідних. Основним джерелом енергії передбачається використовувати локальні запаси глюкози й амінокислот, що знаходяться в організмі, який досліджується.

- Лікування буде полягати у введенні нанороботів в організм (людське тіло) для аналізу ситуації і прийняття рішення про вибір методу лікування. Для комунікації нанороботів в рідких середовищах можуть бути використані акустичні сигнали, світлове (електромагнітне) випромінювання, хімічні процеси.
- Хімічні реакції можуть бути використані для ближньої орієнтації та комунікації нанороботів, акустичні сигнали переважають на далеких відстанях, а оптичний зв'язок, хоча і є досить швидким, але споживає значну кількість енергії.
- Залежно від виконуваних функцій медичні роботи класифікують на мікрофагоцити, респіроцити, клотоцити, вас-кулоїди та інші .
- **Мікрофагоцити** є штучними імунними клітинами, призначеними для очищення крові від шкідливих мікроорганізмів, забезпечення згортання крові, транспорту кисню і вуглекислого газу і розширення можливостей імунної системи. Мікрофагоцити будуть знаходити в організмі людини чужорідні елементи і переробляти їх в нейтральні з'єднання. **Респіроцити** – аналоги еритроцитів (червоних кров'я-них тілець, що доставляють кисень до клітин), які повинні мати більшу функціональність, ніж природні еритроцити.
- **Клотоцити** – аналоги тромбоцитів (клітин, що беруть участь у згортанні крові). Ці машини дозволять швидко припиняти кровотечі. Їх функція полягає в оперативній доставці до місця кровотечі в'яжучих компонент, які повинні затримувати кров'яні клітини, зупиняючи потік крові. Час і місце травми задається зовнішніми сигналами або визначається за парціальним тиском газу. **Васкулоїд** – механічний протез, створений на основі мікрофагоцитів, респіроцитів і клотоцитів, і входить до складу проекту по створенню робототехнічної крові («Roboblood», розроблений К. Феніксом і Р. Фрайтасом). У цьому проекті описаний комплекс медичних нанороботів, здатних жити і функціонувати в тілі людини, виконуючи всі функції природної кровоносної системи.

- Для маніпуляції клітинами, тканинами та іншими біологічними об'єктами, використовують мікроманіпулятори, які повинні керуватися мікроактиваційними механізмами, здатними працювати в провідному розчині: магнітна, пневматична, теплова і сплавів пам'яті форми активація.
- Біологічні мікро електромеханічні системи (**БіоМЕМС**) спрямовані на діагностику біо-, медичних приладів, виявлення ДНК, вірусів, білків та інших біологічно отриманих молекул. Нанорозмірні БіоМЕМС можуть в режимі реального часу виявити та зробити аналіз функціонування клітини та сповістити про її стан досліднику.
- На сьогоднішній день всі розробки в галузі наномедицини та нанобіології залишаються на стадії розробки та тестування, але спектр їх можливого використання дуже широкий.
- Доставка ліків до уражених клітин дозволяє медикаментам потрапляти лише у хворі органи, уникаючи здорові, яким ці ліки можуть завдати шкоди. Наприклад, променева терапія і хіміотерапевтичне лікування знищують хворі клітини, але разом із тим гублять здорові. Вирішення цієї проблеми може полягати у створенні керованого «транспорту» для ліків, варіанти якого вже запропоновані деякими університетами і науковими організаціями. Як транспортні засоби для постачання лікарського препарату в уражену область використовуються полімери, дендримери, кремнієві структури, біологічні молекули, вуглецеві структури (у тому числі, фулерени), металеві наночастинки в оболонці і т. д. Наприклад, до порожнистих металевих наночастинок (золото, срібло, платина і паладій) ліки приєднуються методами силанізації або електростатичним способом. У необхідному місці здійснюють нагрів наночастинок (інфрачервоним випромінюванням або змінним електромагнітним полем), в результаті якого відбувається вивільнення препарату.
- Розроблений противірусний засіб, який назвали вірусна «липучка» і за своїм принципом дії нагадує липкий папір. Схема отримання наведена на рис. 11.



- Спочатку на силіконові наночастинки осаджували віруси, після чого їх наполовину покривали шаром полімеру так, щоб від них можна було позбутися. Потім, за допомогою ультразвуку вірусні об'єкти видалялися і в результаті виходили нанокільки вкриті полімером з відбитками вірусів. Якщо вірус потрапляв у такий відбиток-пастку, він вже не міг звільнитися. Оптимізувавши товщину липкого полімерного шару, вчені перевірили «липучку» у вірусному розчині, помістивши її у сироватку людської крові, що містила віруси. За півгодини на ній знаходилося 88% вірусів, хоча їх концентрація була низькою, а у водному розчині ефективність виявилася ще вищою.
- Поява нанотехнологічних розробок у біомедицині здається, має великі перспективи, але залишаються численні невирішені питання, насамперед, питання про безпеку наночастинок для організму людини. Токсичність зростає із зменшенням розмірів частинок, тобто наночастинки певного матеріалу можуть бути шкідливими для живих організмів, проте у масивному стані вони не проявляють токсичних властивостей. Підозри щодо токсичності підлягають не лише фулерени і нанотрубки, а й наночастинки двоокису титану, які вже широко використовуються в косметичці, а також перспективні з погляду медичного використання частинки срібла і квантові точки. Навіть такі біосумісні матеріали, як кераміка і алюміній, при використанні для імплантації та протезування можуть служити джерелом наночастинок, що накопичуються у внутрішніх органах і викликають алергічні реакції і васкуліти.
- У зв'язку з цим з'являється потреба у новій міждисциплінарній галузі знань як нанотоксикологія, завдання якої полягає не лише у виявленні можливих шкідливих впливів нанооб'єктів на людський організм, але і цілеспрямованої модифікації властивостей частинок з метою попередження (уникнення) цієї шкоди при збереженні їх корисних властивостей.