

# ЗМІСТ

|  |    |
|--|----|
| <b>Перелік скорочень</b> .....   | 10 |
| <b>Передмова</b> .....   | 11 |
| <b>Вступ</b> .....   | 15 |
| <b>Розділ 1. Базові фізичні і математичні моделі мікро- і наноелектромеханічних систем</b> .....   | 17 |
| § 1.1. Елементи фізичної механіки<br><i>Елементи аналітичної механіки: загальні положення; сила інерції Коріоліса; кути Ейлера; гіроскопічний ефект та елементи динаміки гіроскопа; елементи механіки пружно- деформованого тіла; згинна деформація з одним вільним кінцем, згинна деформація пластин; механічні дво- і чотириполюсники та формулювання компонентних і топологічних рівнянь</i> .....  | 17 |
| § 1.2. Елементи мультифізичного моделювання<br><i>Загальна концепція мультифізичного моделювання. Метод фізичних аналогій: електродинамічні аналогії; електромеханічна аналогія між реактансами. Добротність осцилятора. Чинні значення параметрів коливної системи. Моделювання динамічних систем методом фазового портрета. Енергетичний аналіз коливних процесів. Імовірнісний аналіз коливнь осцилятора. Моделювання методом ротації векторних фізичних величин. Електромагнітні та квантово-хвильові математичні моделі: заломлення і повне внутрішнє відбиття світла на межі поділу; френелівське відбиття світла; інтерференція Фабрі–Перо. Корпускулярно- хвильові процеси в квантових ситемах: хвильова функція та її фізичний зміст; Тунелювання електронів та його фотонно-оптична аналогія; елементи квантової моделі інформації. Фізичні закономірності формування наносистем</i> ..... | 26 |
| § 1.3. Статистичні методи моделювання<br><i>Статистичне опрацювання результатів вимірювань: елементарні поняття теорії похибок; поширення похибки вимірювань аргументу на похибку функції; статистична флуктуація адитивних фізичних величин; метод статистичних випробувань Монте-Карло. Алгоритм Метрополіса. Статистичний аналіз випадкових процесів: стаціонарний випадковий процес; статистичні характеристики випадкових процесів. Метод спектральної густини потужності процесу (PSD-метод); алгоритм варіації Аллана; елементи фрактального аналізу</i> .....  | 58 |
| § 1.4. Аналіз фізичних ефектів методом масштабування<br><i>Метод масштабування. Аналіз кантилеверних систем методом масштабування. Масштабування нановимірних об'єктів. Багатомасштабне моделювання. Аналіз основних числових методів багатомасштабного моделювання. Міждисциплінарний підхід до комп'ютерного моделювання</i> .....   | 76 |
| § 1.5. Математичні моделі вимірювальних систем і шумів<br><i>Диференційні моделі вимірювальних систем. Перехідна функція: ступінчата дія; прямокутний імпульс; прямокутна хвиля. Передатна функція функціональної системи. пропорційно-інтегродиференційні регулятори. Фундаментальні обмеження точності пристроїв МСТ. Моделі джерел шумів МСТ: стохастична модель шуму та стохастичний осцилятор; дробовий шум, або шум квантування; шум Джонсона або тепловий білий шум; Температурний шум; флікер-шум миготінь або нестабільність зміщення нуля; шум блукання; мультиплікативна систематична похибка; синусоїдний шум; інформаційний шум; цифровий шум зображень; броунівські шуми та їх фрактальність. Кореляційна фільтрація шумів. фільтри Вінера і Калмана; фундаментальні обмеження точності пристроїв МСТ</i> .....  | 86 |

|  |     |
|--|-----|
| § 1.6. Статистичні флуктуації, зумовлені поверхнею із випадковим мікрорельєфом<br><i>Нормовані параметри шорсткості поверхні. Статистична модель шорсткостей поверхонь</i> .....   | 104 |
| § 1.7. Моделювання мікромеханіки кантилеверних і мембранних систем<br><i>Динаміка коливань кантилевера як системи із зосередженими параметрами маси і жорсткості. Динаміка коливань кантилевера як системи із розподіленими параметрами маси і жорсткості. Статична деформація мікроконсолі. Статично визначена і невизначена задачі деформації торсіонів. Методи визначення модуля Юнга кантилевера. Механічні і температурні шуми систем кантилеверного типу</i> .....   | 111 |
| Список літератури до 1 розділу.....  | 123 |
| <b>Розділ 2. Компоненти вбудованої мікросистемної техніки</b> .....  | 129 |
| § 2.1. Фізичні принципи інтеграції МЕМС як вбудованої мікросистемної техніки.....  | 129 |
| § 2.2. Базові моделі ефектів і процесів у сенсорах фізичних величин<br><i>Сенсори. Фізичні моделі ефектів і процесів у сенсорах фізичних величин. Інтелектуальні сенсори</i> .....   | 131 |
| § 2.3. Основні математичні моделі сенсорів інерції<br><i>ММ акселерометрів. ММ мікрогіроскопів. Похибки і тестування ММА і ММГ. Аналіз шумів інерційних давачів методом варіації Аллана</i> .....  | 139 |
| § 2.4. Вбудовані мікро- і наноелектромеханічні системи зондування сенсорного типу<br><i>Основні типи зондової сканувальної мікроскопії, яка сканує спектром на основі тунельних сенсорів (scanning tunneling microscopy – STM). Атомно-силова мікроскопія (atomic force microscopy – AFM) на основі зондів кантилеверного типу. Основні моделі взаємодії вістер зонда АСМ із поверхнею зразка. Контактний режим роботи АСМ. Вібраційні режими АСМ: Безконтактний режим АСМ, напівконтактний (переривчатий (tapping mode)) режим роботи АСМ; аналітичний аналіз вібраційного методу. Фазовий контраст. Режим модуляції сили. Система зворотного зв'язку. Зонди кантилеверного типу. Сканери. Вплив навколишнього середовища на АЧХ кантилевера. Захист зондів від шумів. Основні похибки вимірювань за допомогою СЗМ. Інтернет-практикум із СЗМ. МЕМС-сенсори на основі зв'язаних резонаторів</i> ..... | 157 |
| § 2.5. Статистична оптимізація мікросистемної техніки<br><i>Вступні поняття. Параметрична оптимізація. Засоби числового розв'язування задач оптимізації Toolbox. Критеріальна оптимізація, або оптимізація за Парето. Оптиміальне проектування силових конструкцій методом параметричної оптимізації. Метод змінної густини та силовий фактор. Оптимізація шумів, сенсорів руху</i> .....  | 181 |
| Список літератури до 2 розділу.....  | 208 |
| <b>Розділ 3. Матеріали і технології для МЕМС</b> .....   | 213 |
| § 3.1. Базові активні і конструкційні матеріали<br><i>Активні матеріали: кремній; технологічний кремній для мікросистемної техніки; діоксид кремнію (<math>SiO_2</math>); нітрид кремнію (<math>Si_3N_4</math>); карбід кремнію (<math>SiC</math>); германій (<math>Ge</math>); бінарні напівпровідники типу <math>A_3B_5</math>. Допоміжні та конструкційні матеріали: акцепторні елементи; донорні елементи. Матеріали для електродних сплавів; флюси і припої; метали і сплави спеціального призначення. П'єзоелектричні матеріали для МЕМС. Інтелектуальні конструкційні матеріали. Молибденіт</i> .....   | 213 |

### § 3.2. Наноматеріали і наноструктури

*Деякі основні поняття і терміни. Розмірне квантування електронного спектра. Структури із штучним квантуванням електронного спектра. Вплив розмірного фактора на фізичні властивості наносистем. Роль поверхні в структуруванні наносистем. Методи моделювання та моделі наносистем. Елементи наномеханіки. Прояв розмірного ефекту в електричних властивостях. Розмірна модуляція магнітних і термодинамічних властивостей. Транспортні властивості мікро- і наноструктур. Низхідні і висхідні методи наноструктурування матеріалів. Нанокompозитні системи фрактального типу. Волокнисті нанокompозити. Нанопоруваті системи*..... 229

### § 3.3. Базові технології електронних матеріалів

*Синтез монокристалів і епітаксія шарів. Формування полікристалічного кремнію. Технологія синтезу оксиду і нітриду кремнію. Молекулярно-пучкова епітаксія (МПЕ). Базові нанотехнології: атомна інженерія наноструктур; наноліторгафія; напрофілювання; нанодрук; саморегульовальні нанопроцеси; самоскладання. Фізико-хімічні процеси структурування наноматеріалів. фізичні обмеження* ..... 247

### § 3.4. Базові мікротехнології електромеханічних систем

*Вступні поняття. Загальна характеристика технологічних процесів виготовлення МЕМС-елементів: окиснення кремнієвих пластин; літографія; травлення; легування; герметизація. Базові мікротехнології виготовлення МЕМС: EFAB; мікрообробка LIGA; SUMMiT; MUMPs (Multi User MEMS Process)-технологія; об'ємна технологія мікрообробки; технологія мокрого хімічного травлення; сухе травлення кремнієвих структур МЕМС; кремнієва поверхнева мікротехнологія структур мікромеханіки (Surface Micromachining). Елементи технології виготовлення електромеханічних мікроприладів: технологія виготовлення тензочувливих ділянок; технологія виготовлення кремнієвих кантилеверів; технологічні особливості формування датчиків МЕМС-ММА. Вплив фізичних властивостей конструктивних матеріалів на технологію виготовлення акселерометрів. Технологія виготовлення теплових приймачів. Фізичні та схематехнічні обмеження* ..... 257

Список літератури до 3 розділу ..... 283

## **Розділ 4. САПР мікро- і наноелектромеханічних систем та вбудованої системної техніки на їх основі**..... 287

§ 4.1. Фізичне і математичне забезпечення САПР мікро- і наносистемної техніки  
*Методологія проектування в МСТ. Роль вимірностей і масштабування в проектуванні МСТ. Основні концепції та програмні засоби проектування мікро- і наносистемної техніки. Багаторівневе проектування. Проектування на компонентному і системному рівнях. Проектування в середовищі Matlab/ Simulink. Опис поведінкових моделей у VHDL-AMS*..... 288

§ 4.2. Вбудовані макро-, мікро- і наносистеми та принципи їх проектування  
*Загальна інформація. ВС мікроелектромеханічного типу. Проектування ВС в ANSYS . Деякі математичні моделі візуального графічного програмування: графічний метод імітації; проектування ВС у віртуальному середовищі LabVIEW. Модель-орієнтоване, або модельне проектування. Проектування ВС на основі поведінкової моделі. Проектування вбудованих кіберфізичних систем. Вбудовані мікроелектронні системи* ..... 302

§ 4.3. Проектування вбудованої інерційної системи на основі гіроскопа-акселерометра та платформи Arduino  
*ММ навігаційної системи на основі інерційного сенсора. Проектування модуля інерції на основі платформи Arduino: платформа Arduino; МЕМС-інерційний вимірювальний чип MPU – 6050;*

|   |            |
|---|------------|
| <i>під'єднання датчика руху GY-521 до контролера Arduino; Тестування Arduino з MPU – 6050; запуск Arduino в Matlab. Приклад моделювання фізичних процесів на основі платформи Arduino .....</i>   | 313        |
| <b>§ 4.4. Проектування інтелектуальних вбудованих систем</b>  |            |
| <i>Смарт-сенсорні системи. Інтелектуальні вбудовані системи. САПР інтелектуальних систем. Проектування інтелектуальних робототехнічних систем та маніпуляторів.....</i>   | 326        |
| <b>§ 4.5. Інструментальні засоби проектування “інтелектуального будинку” .....</b>  | <b>334</b> |
| <b>§ 4.6. Сучасні тенденції проектування інтелектуальних високотехнологічних наносистем</b>   |            |
| <i>Фізичні принципи проектування квантових приладів. Проектування елементів наноелектроніки. Статистичні і систематичні похибки проектування наносистем.....</i>  | 335        |
| Список літератури до 4 розділу.....   | 340        |
| <b>Розділ 5. Практикум комп’ютерного моделювання базових явищ та процесів у мікро- і наносистемах</b>   |            |
| <i>Алгоритмізація задач різницевиими рівняннями. Метод безвимірних змінних. <u>Алгоритмізація випадкових процесів</u>: Випадкова координата; Випадкова сила. Алгоритмізація базових моделей мікро-і наносистемної техніки методами комп’ютерної фізики.....</i> | 345        |
| Список літератури до 5 розділу.....   | 396        |