

УДК 681.2

МІКРОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ У СУЧАСНОМУ ПРИЛАДОБУДУВАННІ

© Гірняк Юрій, 2008

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра приладів точної механіки,
вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна

Аналізується стан мікросистемного приладобудування як перспективний напрям розвитку науки та техніки, подається описання основних вузлів мікроелектромеханічних систем з описанням конструктивних особливостей та галузей їхнього застосування. Також розглядається проблематика проектування та виготовлення мікросистемних приладів.

Анализируется состояние микросистемного приборостроения как перспективное направление развития науки и техники, подается описание основных узлов микроэлектромеханических систем с описанием конструктивных особенностей и отраслей их применения. Рассмотрена проблематика проектирования и изготовления микросистемных приборов.

The state of the microsystem technology as perspective direction of science and technique development is analyzed; description of the microelectromechanical systems basic parts and description of structural features and industries of their application are given. The design and production problems of the microsystem devices are discussed too.

Вступ. За висновками експертів з аналізу ринку сьогодні одним з найперспективніших є ринок мікросистемних технологій, що сягнув 40 млрд. доларів станом на 2006 рік зі значними показниками росту [1]. Самі мікросистемні технології (МСТ) почали розвиватися ще з середини ХХ ст. і, отримуючи щоразу нові поштовхи з боку нових винаходів, чергових удосконалень технологій, нових галузей науки та техніки, динамічно розвиваються і дедалі ширше застосовуються у широкому спектрі промислової продукції у всьому світі [2].

Сама галузь мікросистемних технологій (МСТ) почала свій розвиток з амбіційного проекту однієї американської лабораторії, що працювала з напівпровідниками. В 60-х роках ними було запропоновано і виготовлено кремнієву мікромембрану на кристалі кремнію з застосуванням технологій, що, зазвичай, використовуються для виготовлення напівпровідникових пристроїв [3]. Таку мембрану було запропоновано застосовувати у вимірювачах тиску замість звичайних металевих. Переваги такої розробки здавалися незаперечними, хоча і вимагали удосконалення технологічного процесу та методики вимірювань переміщень мембрани. Проте чи не найбільшого поштовху розвитку мікросистемних технологій було надано у 80-х роках – удосконалені технологічні процеси оброблення матеріалів, нові

матеріали, поява принципово нового обладнання, використання можливостей електронно-обчислювальної техніки тощо, – все це принципово змінило підхід до виготовлення не лише мікросистем.

Назва “мікросистемні технології” (МСТ) вживається найчастіше в Європі, у країнах Америки здебільшого використовують назву “мікроелектромеханічні системи” (МЕМС), а в країнах Азії поширена назва “мікронаука” або “мікронаука”, натякаючи на значну частку наукової роботи інженерів цієї галузі. За такою назвою ховається значний обсяг наукових досягнень у різноманітних галузях. Сам по собі прилад МЕМС є об’єднанням електричних та механічних елементів в одну систему дуже мініатюрних розмірів (значення розмірів механічних елементів найчастіше лежать у мікронному діапазоні), і достатньо часто такий прилад містить мікрокомп’ютерну схему керування для здійснення запрограмованих дій у системі та обміну інформацією з іншими приладами та системами.

Класифікація пристроїв МЕМС є достатньо об’ємною та, наразі, неусталеною. Це пов’язано з великою кількістю можливих застосувань, появою щоразу нових пристроїв та їхнім використанням у нових галузях. Пристрої МЕМС можна класифікувати за сферою застосування, за кількістю використаних елементів, за розмірами усієї конструкції, за вико-

ристаними фізичними явищами, за технологією виготовлення тощо [2].

Зосередження різноманітних та різнорідних елементів в одній системі змушує об'єднувати різноманітні технології, характерні для певного виду елементів. Інколи розробникам доводиться винаходити нові технологічні процеси та принципи для оптимального виготовлення та розміщення необхідної кількості різних елементів.

Навіть з побіжного аналізу структури МЕМС зрозуміло, що сумарний технологічний процес є дуже складним і тривалим. Так, залежно від складності пристрою технологічний процес його виготовлення, навіть із застосуванням сучасних технологій, може тривати від кількох днів до кількох десятків днів. Попри саме виготовлення, доволі тривалими є перевірка та відбраковування. Часто виготовляється відразу партія однотипних пристроїв, причому вихід якісної продукції часто не перевищує 2 %.

З іншого боку, достатньо зручно та доцільно розглянути внутрішню будову та принципи функціонування таких пристроїв, що забезпечує ґрунтовніше розуміння пристрою.

Структура мікроелектромеханічних систем. МЕМС складається з низки елементів, які призначені для виконання більше ніж однієї функції. Рішення про це приймається конструктором, якщо необхідно зменшити кількість елементів конструкції чи задля спрощення технологічних процесів. Але ще й досі використовуються такі елементи, про які можна сказати, що вони виконують ту чи іншу певну функцію.

Загалом МЕМС можна розглядати як пристрій, що містить функціональні модулі: *виконавчий механізм* – мікрорухай для приведення у рух необхідних механізмів – інколи його називають мікроактюатором чи просто актюатором (з англ. *actuator* – виконавчий механізм); *чутливий елемент*, чи сенсор (з англ. *sensor* – давач, первинний вимірювальний перетворювач), що реагує на зміну певної фізичної величини і перетворює її до відповідного виду; *керований механізм* – завершальна ланка ланцюга керування (таких ланцюгів керування може бути кілька, і вони можуть бути різними) – такими механізмами можуть бути мікродзеркала, керовані мікроклапани, мембранні мікропомпи тощо; *пристрої передавання енергії* – для передавання енергії (руху, електричного струму, тиску рідин тощо) від однієї ланки до іншої

ланки; *пристрої керування (електричні чи механічні)* – для приведення у дію відповідних актюаторів, часто з урахуванням інформації від сенсорів та відповідно до закладених принципів побудови МЕМС.

Для виготовлення сучасних МЕМС використовується широка гама матеріалів: різноманітні метали у чистому вигляді та у сплавах, неметали, мінеральні сполуки та органічні матеріали. Звичайно, намагаються використовувати якомога меншу кількість різнорідних матеріалів, щоби покращити технологічність МЕМС та знизити собівартість продукції. Тому розширення спектра матеріалів прийнятне лише за наявності специфічних вимог до елементів пристрою [5].

Частка приладів МЕМС у промисловій продукції невпинно зростає з року у рік. Така популяризація МЕМС зумовлена широким спектром їхнього застосування чи не у кожній сфері діяльності людини. Такі прилади зручно та вигідно використовувати практично усюди завдяки їхнім перевагам над традиційними пристроями. Малі розміри, низьке споживання енергії, велика щільність розміщення елементів системи усередині, можливість створювати пристрої з набором функцій та параметрами, необхідними конкретному замовнику – ось основні привабливі характеристики, що впливають на прийняття рішення інженерами багатьох світових підприємств різних розмірів на користь збільшення частки використання МЕМС у своїй продукції.

Основні принципи функціонування мікроелектромеханічних систем. Розглядаючи увесь спектр МЕМС, необхідно ознайомитись з основними принципами та методами їхнього функціонування.

Актюатори. Як було зазначено вище, одним з основних елементів МЕМС є актюатори – вузли, що виконують функцію перетворення одного виду енергії на інший вид (здебільшого, на механічну роботу). Для створення цих вузлів можуть використовуватися різні фізичні явища, і їхня кількість безперервно зростає.

Часто застосовуються *електростатичні, термоелектричні, п'єзоелектричні, осмотичні, гідравлічні, пневматичні, електромагнітні* та інші типи актюаторів. Звичайно, кожен з цих видів має переваги для якогось конкретного випадку що зумовлено технологічними умовами та конструкторським рішенням. Також не варто забувати про недоліки певних типів пристроїв за конкретних умов їхнього використання.

Чи не найпоширенішим є використання *електростатичного* актюатора. Його дія ґрунтується на використанні сили притягання між електродами з різними зарядами. Для збільшення сили притягання застосовують електроди у вигляді гребенів, пальців яких розміщені у міжпальцевих проміжках іншого електрода. Ця конструкція дає змогу на малій площі виготовити електроди зі значною поверхнею. У таких конструкціях використовується втягування пальців одного гребеня у міжпальцеві проміжки іншого під дією електростатичної сили. Сила, яку розвиває такий актюатор, є незначною і залежить від напруги між електродами та від площі взаємодії електродів – залежно від використаних технологій сила, яку розвивають такі мікроактюатори, може сягати 1–10 мкН/мм² при напрузі 15 В [1]. Тому для збільшення тягової сили часто користуються нарощуванням кількості електродів (т. зв. каскадний актюатор) чи збільшенням робочої напруги між електродами. Сам актюатор є простим у виготовленні і не вимагає використання великої кількості типів матеріалів – здебільшого для формування структури актюатора використовується кремній, що проводить електричний струм сам, а для покращання провідності використовується насичення різними домішками (*n*-, *p*-кремній), для формування діелектрика застосовують оксид кремнію, що достатньо просто отримують окисненням кремнію, чи використовують властивості *p-n*-каналу. Взагалі кремнієва технологія для виготовлення МЕМС є найпривабливішою сьогодні, оскільки не вимагає значних змін технології виготовлення кремнієвих інтегральних мікросхем.

Термоелектричні актюатори за дією нагадують реакцію біметалевої пластини на її нагрівання. Сама конструкція залежно від напрямку дії (горизонтальна – переміщення лежить у площині основи, вертикальна – у напрямку від основи вгору) має різний вигляд. На відміну від біметалевої пластини, де використовуються два типи металів з різними коефіцієнтами теплового розширення, в МЕМС актюаторах часто застосовують конструкції у вигляді петлі, що утворюється двома чи більшою кількістю пластин з різною площею поверхні. Одні кінці пластин жорстко закріплені на основі, а інші мають спільну точку кріплення. Через таку петлю пропускають електричний струм і пластини нагріваються. Завдяки різній площі їхніх поверхонь вони видовжуються по-різному. За певного з'єднання кінців такої петлі виникає результуюча сила, що переміщує кінець у бік холоднішої пластини.

Звичайно, конструкція таких актюаторів може і бути іншою, але принцип функціонування залишається тим самим. Серед наявних конструкцій заслуговують на увагу також каскадні термоелектричні актюатори, в яких незначне переміщення одного елемента можна збільшити завдяки використанню кількох актюаторів, де кожен новий елемент прикріплений до “рухомого” кінця попереднього.

Електромагнітні актюатори також поширені у МЕМС. Але потреба у виготовленні котушок достатньо великих розмірів, застосуванні феромагнітних матеріалів чи постійних магнітів дещо гальмує застосування таких механізмів. Незважаючи на перелічені незручності, ці актюатори успішно використовуються багатьма виробниками МЕМС. Найпоширенішими конструкціями електромагнітних актюаторів є дві: одна – з нерухомими котушками керування та з рухомими елементами (якорями) з феромагнітних матеріалів; інша – з котушкою, поміщеною на рухомий елемент, і вся конструкція приладу перебуває у сильному магнітному полі постійного магніту, розміщеного над системою. Це саме магнітне поле може використовуватися іншими актюаторами у радіусі дії магнітного поля. Звичайно, конструкцію пристроїв вибирають залежно від багатьох чинників, зокрема враховується собівартість приладу, що зростає через ускладнення технологічного процесу.

Доволі поширене використання *п'єзоелектричного* ефекту для побудови актюаторів МЕМС. Хоча такі актюатори і ускладнюють технологічний процес та збільшують розміри конструкції, але велика навантажувальна здатність цього актюатора компенсує зазначені недоліки. На практиці використовується ряд різноманітних конструкцій такого актюатора. Широкий спектр сучасної п'єзокераміки дає змогу максимально пристосувати актюатор до всіх вимог як конструкції, так і електронної системи приладу.

Багато вчених та конструкторів МЕМС вважають, що у найближчому майбутньому найперспективнішими будуть *гідролічні* та *пневматичні* актюатори. На сучасному етапі існують гідролічні турбінні актюатори, що перетворюють потік рідини на обертний рух турбіни, та актюатори *осмотичного* типу [6] – тиск рідини приводить у рух еластичну мембрану.

Цілком зрозуміло, що для функціонування актюаторів таких типів недостатньо мати лише мембрани та турбіни. У цих випадках необхідно створювати

мініатюрні компресорні системи на цій самій основі. Такі компресори часто мають вигляд мембранної помпи з приводом від п'єзоелектричного актюатора. Окрім компресорної системи, необхідно мати регулювальну та керуючу систему, що додатково ускладнює систему. Але все ж переваги таких актюаторів доволі відчутні – проста конструкція осмотичних актюаторів, підведення та відведення робочої рідини здійснюється по малих каналах і може використовуватись багатьма системами, переносити теплоту тощо.

Звичайно, розглянуті методи та способи приведення в рух не вичерпуються вищеописаними. Використання якогось конкретного типу актюатора зумовлюється, передусім, конструкторською доцільністю, доступними на певний період технологічними можливостями, та, звичайно, вартістю.

Сенсори. Те саме можна сказати і про використання різних типів сенсорів у приладах МЕМС. Спектр наявних типів сенсорів в арсеналі конструктора значно ширший та різноманітніший, що зумовлено багатоплановим застосуванням МЕМС. Переважно використовуються ємнісні, п'єзоелектричні, тензорезистивні, терморезистивні, фотоелектричні сенсори, сенсори на ефекті Хола тощо.

Так, *ємнісні* сенсори часто використовуються для вимірювання переміщень різноманітних механічних елементів. Часто сам сенсор має вигляд гребенів-електродів, що своїми пальцями входять у міжпальцеві проміжки іншого гребеневого електрода. Іншою конструкцією ємнісного сенсора можуть бути і дві пластини, одна з яких нерухома, а інша – рухома, наприклад, мембрана чи пружна балка тощо. Конструкція ємнісного сенсора забезпечує зміну відстані між пластинами чи площі цих поверхонь пластин, що розміщені у безпосередній близькості.

Всі елементи та вузли багатьох МЕМС можна розділити на дві групи: група основних елементів та вузлів, призначених для безпосереднього виконання основної функції, заради якої було створено цей прилад, та інша група – група допоміжних елементів та вузлів, призначених для забезпечення працездатності основної групи. Як приклад можна навести більшість вищеперелічених сенсорів, які слугують для перетворення переміщень пружних первинних вимірювальних перетворювачів: пружних балок, мембран, пружин, стержнів, струн тощо. Також яскравим таким прикладом є використання гідравлічної системи (помпи, провідних каналів, клапанів та спеціальних

електронних схем) для приведення в рух основних вузлів, які могли б використовувати й іншу енергію.

Пристрої керування. Електронні пристрої керування МЕМС виконують різні функції. Ураховуючи те, що сучасні електронні системи здебільшого ґрунтуються на цифрових технологіях, знайти пристрій без мікрокомп'ютера стає дедалі важче. Функції обміну інформацією між сенсорами та виконавчими механізмами саме й виконують мікроконтролери. Звичайно, поширене й використання аналогових систем, але найбільшою гнучкістю, функціональністю та зручністю для користувача все ж характеризуються цифрові системи на спеціалізованих мікрокомп'ютерах – спеціальних мікроконтролерах. Подання результатів вимірювання у цифровому вигляді є найприйнятнішим з погляду простоти побудови систем та якості опрацювання таких результатів на електронно-обчислювальних машинах. Інколи навіть використовується попереднє оброблення цих результатів всередині прилада МЕМС.

Система керування попри функції інтерфейсу з системою користувача може виконувати й допоміжні функції щодо забезпечення роботи усієї системи. Це можуть бути функції формування певних електричних сигналів, функції самоперевірки, калібрування тощо.

Галузі застосування. Як було зазначено вище, виготовляють прилади МЕМС для вирішення надзвичайно великої кількості завдань у різних галузях науки та техніки, і сфера їхніх практичних застосувань щоденно розширюється. Для цілісності картини можна навести кілька прикладів використань технологій МЕМС. Наприклад мікроакселерометри та мікрогіроскопи на основі МЕМС широко застосовують у багатьох видах сучасної техніки, завдяки чому ці пристрої “відчувають” зміну свого розміщення у просторі і реагують на нього. Найпоширенішими є вмонтовані у систему пасивної безпеки автомобіля мікроакселерометри для визначення моменту викиду повітряної подушки. Ця група приладів МЕМС має найбільшу частку на ринку МЕМС технологій. Друкуючі головки струменевих принтерів також виготовляють за допомогою технологій МЕМС, і частка цих пристроїв також поступово зростає. У медицині, фармакології та хімічній промисловості також широко використовуються прилади МЕМС, зокрема, як мікродозатори, мікрофільтри, часто також застосовуються лише окремі технології та матеріали, що використовуються для виготовлення приладів

МЕМС, наприклад, кремнієві мікроголки, спеціальні електроди для електронних стимуляторів тощо.

З розвитком високошвидкісних оптико-волоконних ліній передавання інформації вирішенням проблеми їхнього перемикання з найменшими втратами достатньо ефективними стали спеціалізовані оптичні комутатори МЕМС з багатьма каналами комутації. У таких приладах можуть використовуватися різноманітні методи перенапрявлення світлового потоку, зокрема, це може бути масив керованих мікродзеркал, що відхиляються на визначений кут за командою від електронної системи керування. Такий самий принцип часто використовують для побудови цифрових проекторів та проєкційних телевізорів. Якість зображення таких пристроїв є не гіршою від традиційних відеопроєкційних систем, а інколи навіть і кращою.

Проблеми проектування мікоелектромеханічних систем. Перераховувати конкретні застосування приладів МЕМС можна надзвичайно довго, але всі ці прилади створені конструкторами МЕМС як результат чіткого уявлення про можливості використовуваних технологічних процесів під час розв'язання поставленої задачі. Основними проблемами залишається розробка нових ефективних технологій формування об'ємних структур з різних матеріалів. Необхідно запропонувати технологію з достатньою роздільною здатністю для створення ще менших деталей та елементів з високими механічними характеристиками. Ще однією проблемою для мікросистемних технологій (МСТ) також є обмежений спектр матеріалів, що використовуються для виготовлення МЕМС. Створення нових та залучення вже випробуваних матеріалів до мікросистемних технологій – основні задачі, що стоять перед технологами МЕМС. Нові матеріали з унікальними властивостями та характеристиками можуть значно спростити конструкцію мікросистем чи розширити їхню функціональність.

Істотними постають і питання проектування окремих елементів конструкції МЕМС та усієї системи загалом. Щоб оцінити поведінку майбутньої конструкції у різних умовах експлуатації та вплив різноманітних навантажень, потрібно створювати складні математичні моделі для урахування багатьох чинників, що впливають на роботу МЕМС. Щоб створити таку модель, необхідно залучати значні інформаційні ресурси: довідкові та експериментальні дані щодо

характеристик конструктивних матеріалів, різноманітні складні фізико-математичні теорії та відповідне програмне забезпечення ЕОМ для забезпечення роботи таких моделей. Якісні та ефективні моделі значно пришвидшують вихід нової продукції, зменшують витрати на розроблення та модифікацію проміжних примірників. Тому для конструювання відповідного приладу МЕМС фактично неможливо обійтися без спеціальних комп'ютерних конструкторських програм. Сучасні програми конструювання, моделювання та аналізування дають конструктору змогу достатньо швидко створити модель такого приладу, використовуючи електронні бібліотеки конструктивних елементів, матеріалів тощо. Також робота з віртуальною моделлю майбутнього приладу дає змогу здійснити серію випробовувань та проаналізувати поведінку цього приладу в умовах нормальної роботи, перевантажень та нестандартних умов. Така перевірка дає змогу виявити помилки при конструюванні, виборі матеріалів конструкції, а також оптимізувати параметри окремих елементів для відповідного застосування ще на етапах проміжного проектування. Отже, використання програм моделювання та аналізу дає змогу пришвидшити розроблення робочого варіанта приладу, підібрати необхідні технологічні процеси та матеріали і зменшити обсяг випробовувань великої кількості дослідних зразків.

Значна кількість рухомих елементів конструкції сучасного приладу МЕМС є показником складності конструкції та довершеності технологій, що використовуються. Але це є одночасно і випробовуванням конструкторського рішення щодо зручності та продуманості послідовного відтворення усіх необхідних зв'язків – це так звана проблема збирання. Здебільшого намагаються створювати всі елементи об'єднаними в одну складну конструкцію, замінюючи елементи рухомого з'єднання на гнучкі пружні елементи. Але якщо така заміна є неприйнятною, тоді існують два виходи – або робити конструкцію такою, щоб рухомі елементи відділялися від решти на етапі однієї з останніх технологічних операцій так, щоб цей елемент вже перебував на своєму місці, або для його встановлення в необхідну позицію використовувати спеціальні пристрої – мікроманіпулятори з високою точністю позиціонування. Звичайно, у таких випадках перевагу надають проектуванню спеціального технологічного рішення без втручання у послідовність розташування та виготовлення елементів конструкції.

Попри проблему збирання, у таких випадках виникає проблема боротьби з тертям у місцях дотику, що зменшує ефективність їхньої взаємодії. Для приладів MEMS у зв'язку із способом виготовлення, а це, здебільшого, пошарове нарощування матеріалів, через недосконалість технологічних процесів та через надзвичайно малі розміри та сили, що характерні для такого типу приладів, навіть невелика для звичайного приладобудування шорсткість дотичних поверхонь надзвичайно сильно впливає на значення сили тертя та на ступінь зношення. Використання звичайних приладних олів є неприйнятним через їхню велику в'язкість та порівняно великі сили поверхневого натягу, що пов'язано з розміром їхніх молекул. Для рідкого змащення у таких випадках використовується етиловий спирт як рідина з оптимальним розміром молекул та з низькими показниками поверхневого натягу.

Висновки. Попри достатню кількість проблем, що вирішуються під час створення приладів MEMS, вони є надзвичайно привабливими для замовників через велику кількість переваг над традиційними приладами мехатроніки. Значну роль тут відіграють низька маса конструкції, її малі розміри та енергоспоживання, що робить їх привабливими у тих напрямках, де значення сил, що формуються приладами, не відіграє ніякого значення, а лише необхідне для функціонування внутрішніх систем. Інколи прилади

MEMS використовуються лише через можливість виготовлення об'ємних мікроструктур – наприклад, для високочастотних гребневих фільтрів, мікроіндуктивностей та мікроємностей (через малі розміри) тощо. Враховуючи вищенаведене та надзвичайно швидкий рівень росту технологій, можна з впевненістю сказати, що сама галузь MEMS має значні перспективи розвитку та розширення на тривалий період.

1. *Status of the MEMS industry 2007 Edition. Sample of the analysis* – © 2007, Yole Développement SARL.
 2. Шурыгина В. Долгожданные МЭМС. *Технология малых форм.* // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 4/2002. – С.8–13.
 3. *Going beyond silicon MEMS with EFAB technology* // White paper – ©2004. Microfabrica. Inc.
 4. *Microelectromechanical Systems: Advanced Materials and Fabrication Methods* Committee on Advanced Materials and Fabrication Methods for Microelectromechanical Systems, Commission on Engineering and Technical Systems, National Research Council ISBN: 0-309-59151-1, 76 pages, 8.5x11, (1997).
 5. *Implications of Emerging Micro and Nanotechnology* Committee on Implications of Emerging Micro- and Nanotechnologies, National Research Council ISBN: 0-309-50521-6, 266 pages, 6x9, (2002).
 6. Yu-Chuan Su, Liwei Lin, Albert P. Pisano A. *Water-Powered Osmotic Microactuator* // JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS, VOL. 11, NO. 6, DECEMBER 2002.

УДК 621.315.592

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО МАТЕРІАЛУ $ZrNi_{1-x}Fe_xSn$

© Ромака Володимир^{1,2}, Стадник Юрій³, Горинь Андрій³, Лагун Андрій¹, 2008

¹Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

²Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. Підстригача НАНУ, вул. Наукова, 3, 79060, Львів, Україна

³Львівський національний університет ім. І. Франка, вул. Університетська, 1, 79000, Львів, Україна

Досліджені температурні та концентраційні залежності питомого опору, коефіцієнта термо-ЕРС, магнетної сприйнятливості, а також енергетичні характеристики $ZrNi_{1-x}Fe_xSn$ у діапазонах, $T = 80 \div 380$ К, $x = 0, 0,12$. Встановлено температурні залежності термо-ЕРС термоелектричної пари мідь- $ZrNi_{1-x}Fe_xSn$.

Исследованы температурные и концентрационные зависимости удельного сопротивления, коэффициента термо-ЭДС, магнетной восприимчивости, а также энергетические характеристики $ZrNi_{1-x}Fe_xSn$ в диапазоне, $T = 80 \div 380$ К, $x = 0, 0,20$. Определены температурные зависимости термо-ЭДС термоэлектрической пары медь- $ZrNi_{1-x}Fe_xSn$.