

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет електроніки та інформаційних технологій

Кафедра електроніки,
загальної та прикладної фізики

Кваліфікаційна робота магістра

**ЧУТЛИВІ ЕЛЕМЕНТИ ГНУЧКОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ НА ОСНОВІ ПЛІВКОВИХ
МАТЕРІАЛІВ**

спеціальності 171 Електроніка

Здобувач вищої освіти гр. ЕП.м-12

А. О. Проноза

Науковий керівник

к.ф.-м.н., старший викладач

Ю. М. Шабельник

Завідувач кафедри

д.ф.-м.н., професор

І. Ю. Проценко

Суми – 2022

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики
Спеціальність 171 – Електроніка, освітньо-наукова програма
«Електронні інформаційні системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Зав. кафедри ЕЗПФ
І. Ю. Проценко
«14» грудня 2022 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Прозони Андрія Олександровича

Тема роботи **Чутливі елементи гнучкої електроніки на основі плівкових матеріалів**

затверджена наказом по університету від «14» листопада 2022 р., № № 1067-VI

2. Термін здачі студентом закінченої роботи 20 грудня 2022 року

3. Вихідні дані до роботи (актуальність, мета)

В останні роки швидко розвиваються напрямки науки, що займаються дослідженням тонких металевих та напівпровідникових плівок, так як вони мають унікальні в своєму роді властивості, що відкриває для них перспективи для застосування в багатьох галузях науки та техніки. Використання тонких плівок у техніці стало можливим після освоєння методів їх одержання з попередньо заданими фізичними властивостями. Це відкрило можливість їх широкого застосування в оптиці, у техніці надвисоких частот як захисних покриттів, елементів мікроелектронних схем, тензодатчиків, у кріогенній та обчислювальній техніці. За рахунок технологій нанорозмірного напилення та використання гнучких підкладок є можливість створення тонких і надгнучких систем, які можна складати або скручувати без зміни їх функціональності, а також додатково отримати такі переваги, як легка вага, портативність, чудові електричні властивості тощо. Також спостерігається значний інтерес до матеріалів, у яких виникає ефект гігантського магнітоопору (ГМО), з точки зору їх практичного застосування як функціональних чутливих елементів сенсорів гнучкої електроніки.

Метою роботи є вивчення та аналіз функціональних та конструктивних особливостей сенсорів магнітного поля, а також чутливих елементів гнучкої електроніки спіно-клапанного типу та розрахунок основних параметрів спіно-залежного розсіювання електронів в таких структурах.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що належить їх розробити)

1. Розділ 1. Загальна характеристика чутливих елементів гнучкої електроніки на основі плівкових матеріалів.

2. Розділ 2. Методика і техніка експерименту.

3. Розділ 3. Результати розрахунків тришарових плівкових зразків спін-вентильного типу.

4. Висновки

5. Список використаних джерел

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Слайди № 1, 2 – Вступ. Мета та актуальність.

Слайди № 3-5 – Загальна характеристика чутливих елементів гнучкої електроніки на основі плівкових матеріалів

Слайди № 6-8 – Методика і техніка експерименту.

Слайди № 9-13 – Результати розрахунків тришарових плівкових зразків спін-вентильного типу.

Слайд № 14 – Висновки

6. Дата видачі завдання 09.11.2022 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз літературних даних	до 09.12.2022 р.	<i>вик.</i>
2.	Проведення експерименту, моделювання, розрахунків, обробка результатів	до 16.12.2022 р.	<i>вик.</i>
4.	Оформлення тексту кваліфікаційної роботи.	до 20.12.2022 р.	<i>вик.</i>
5.	Попередній захист роботи	21.12.2022 р., онлайн	<i>вик.</i>
6.	Захист роботи в екзаменаційній комісії	28.12.2022 р., онлайн	<i>вик.</i>

Здобувач вищої освіти

Проноза А. О.

Науковий керівник

Шабельник Ю. М.

РЕФЕРАТ

Об'єктом дослідження кваліфікаційної дипломної роботи є функціональні чутливі елементи сенсорів гнучкої електроніки на основі плівкових матеріалів.

Метою даної роботи є вивчення та аналіз функціональних та конструктивних особливостей сенсорів магнітного поля, а також елементів гнучкої електроніки спін-клапанного типу; розрахунок основних параметрів таких пристроїв.

Використання тонких плівок у техніці стало можливим після освоєння методів їх одержання з попередньо заданими фізичними властивостями. Це відкрило можливість їх широкого застосування в оптиці, у техніці надвисоких частот як захисних покриттів, елементів мікроелектронних схем, тензодатчиків, у криогенній та обчислювальній техніці. Спостерігається значний інтерес до матеріалів, у яких виникає ефект гігантського магнітоопору (ГМО), з точки зору їх практичного застосування як чутливих елементів гнучкої електроніки. Ці фактори і визначають актуальність даної роботи, а самі дослідження фізичних властивостей тонкоплівкових структур як чутливих елементів датчиків та сенсорів є важливими та своєчасними.

У результаті проведених наукових досліджень установлені основоположні питання стосовно виготовлення гнучких підкладок, їх матеріалів та експлуатаційних характеристик, а також отримані теоретичні результати по дослідженню фізичних властивостей функціональних елементів спін-клапанного типу на основі Fe і Au, Co і Cu.

Розраховано параметри спін-залежного розсіювання для плівкової системи Fe/Au/Fe/П. Значення величини спінової асиметрії β в зразках Fe(5)/Au(d_{Au})/Fe(5)/П змінюється у межах від 0,44 до 0,75, тоді як для системи Fe(15)/Au(d_{Au})/Fe(15)/П – від 0,42 до 0,62.

Робота викладена на 38 сторінках і складається з трьох розділів, містить 25 рисунків та 3 таблиці.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ТОНКІ ПЛІВКИ, ДАТЧИКИ ХОЛЛА, ПСЕВДО СПІН-КЛАПАН, ГІГАНТСЬКИЙ МАГНІТООПІР, ПАРАМЕТРИ СПІНОВОЇ АСИМЕТРІЇ, МАГНІТОРЕЗИСТИВНІ ДАТЧИКИ, ГНУЧКА ЕЛЕКТРОНІКА.

ЗМІСТ

	С.
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ЧУТЛИВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ГНУЧКОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ НА ОСНОВІ ПЛІВКОВИХ МАТЕРІАЛІВ	7
1.1 Використання гнучких підкладок для формування чутливих елементів електроніки.....	8
1.1.1. Матеріали підкладок.....	8
1.1.2. Сполучні матеріали підкладок.....	10
1.2. Функціональні приладові структури на основі тонких плівок.....	11
1.2.1. Напівпровідникові структури на основі гнучких підкладок.....	11
1.2.2. Імпланти на основі гнучких підкладок.....	20
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ	22
2.1. Методика і техніка отримання зразків.....	22
2.1.1. Методика отримання зразків.....	22
2.1.2. Дослідження товщини методом кварцевого резонатора.....	23
2.2. Методика дослідження магніторезистивних властивостей тонких плівок.....	25
РОЗДІЛ ІІІ. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ ТРИШАРОВИХ ПЛІВКОВИХ ЗРАЗКІВ СПІН-ВЕНТИЛЬНОГО ТИПУ	28
3.1 Вихідні дані.....	28
3.2 Розрахунок параметрів спін-залежного розсіювання.....	29
3.3 Структура з функціональним мультишаром $[Fe(3)/Au(3)]_n$	33
ВИСНОВКИ	35
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	36

ВСТУП

В останні роки застосування гнучкої електроніки в різноманітних галузях набирає все більше обертів. Її застосування може докорінно змінити жорстку фізичну форму традиційних інформаційних пристроїв і систем, реалізувати ефективну інтеграцію інформації з людьми, об'єктами та середовищем, реалізувати гнучкість отримання інформації, обробки, передачі, відображення та навіть генерацію енергії, а також досягти значного зменшення собівартості у порівнянні з традиційною кремнієвою технологією завдяки прогресу в матеріалознавстві та архітектурі пристроїв, що зробило великомасштабне виробництво гнучких пристроїв економічно вигідним варіантом. [2].

За рахунок поєднання технологій нанорозмірного напилення та гнучкої електроніки виникає можливість створення тонких і надгнучких перцептивних систем, які можна згортати або складати без зміни їх функціональності, а також додатково отримати такі переваги, як легка вага, портативність, відмінні електричні властивості та висока інтеграція [3].

Завдяки сучасним матеріалам, як графен або дихалькогеніди перехідних металів були виявлені ідеальні параметри для застосування в датчиках газу та деформації. Подібним чином перовскіти з'явилися як варіант виготовлення надчутливого датчика світла. У той же час комбінації матеріалів і архітектури пристроїв дозволяють покращити як провідність, так і деформовану гнучкість конструкцій. Окрім того, останні дослідження з використанням оксиди металів, кремнієвих наноструктур або органічних матеріалів, призвело до виготовлення високопродуктивних схем.

Основною метою роботи є вивчення та аналіз функціональних та конструктивних особливостей сенсорів магнітного поля, а також чутливих елементів гнучкої електроніки спіно-клапанного типу та розрахунок основних параметрів спіно-залежного розсіювання електронів в таких структурах.

РОЗДІЛ 1

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ЧУТЛИВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ГНУЧКОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ НА ОСНОВІ ПЛІВКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

Гнучка електроніка лежить в основі багатьох інноваційних технологій в галузі паперових скручуваних дисплеїв, носимих датчиків, пристроїв перетворення енергії та ергономічних систем моніторингу здоров'я. Всі вони можуть бути виготовлені на основі тонкоплівкових багатошарових структур. Електронні компоненти у вигляді простих гнучких електронних плат різноманітні за своєю конструкцією і застосуванням. Використання гнучких електронних матеріалів і технологій дозволяє покривати великі площі напівпровідникового матеріалу без втрати продуктивності порівняно з меншими площами. Вершиною технологічної досконалості, досягнутої в даний час у сфері гнучкої електронної технології, є структури із напівпровідникового матеріалу з використанням надтонких діелектричних підкладок, що збільшило рухливість носіїв в 20-50 разів, традиційно використовуваного, а також дозволяє зменшити розмір транзисторів, збільшити кількість пікселів і збільшити швидкість відображення [5]. Крім того, впровадження дисплеїв на основі може зменшити споживання енергії. Все залежить від умов експлуатації майбутнього пристрою та деформацій які будуть на нього впливати як показано на рисунку 1.1



Рисунок 1.1 – Допустимі типи деформації підкладок гнучкої електроніки [5]

В залежності від типу деформації гнучкої електроніки її можна по-різному розділити, а саме на згинання, скручування, одновісну деформацію розтягування, двовісне розтягування деформації, окружної деформації розтягування тощо.

Коли матеріал деформується, відносні положення та відстані між молекулами або іонами всередині нього змінюються, і додаткові внутрішні сили між атомами та молекулами будуть створені для опору зовнішні сили, і робиться спроба відновити стан до деформації. Коли досягається рівновага, додаткові внутрішні сили рівні за величиною і протилежні за величиною напрямку, до зовнішніх сил. Додаткова внутрішня сила на одиницю площі матеріалу називається напруженням, а його величина дорівнює зовнішній силі на одиницю площі [6].

1.1. Використання гнучких підкладок для формування гнучких чутливих елементів електроніки

1.1.1. Матеріали підкладок

Кожен елемент конструкції гнучкої схеми повинен складатися з декількох шарів та відповідати попереднім вимогам до продукту протягом усього терміну служби. Крім того, цей матеріал повинен добре поєднуватися з іншими структурними елементами розгалуження, щоб забезпечити легке і надійне виготовлення. Основним таким елементом є підкладки тобто основа для виготовлення найрізноманітніших елементів.

Підкладкою може служити плівка, яка служить базовою структурою. За нормальних умов основний матеріал гнучких схем забезпечує більшість основних фізичних і електричних властивостей гнучких схем. Він забезпечує всі властивості схемних конструкцій. Більшість гнучких плівок доступні в широкому діапазоні товщин і у вузькому діапазоні відносно тонких розмірів від 12 до 125 мікрон, хоча можливі більш тонкі та товщі матеріали з використанням напилення. Більш тонкі матеріали від природи більш гнучкі, і для більшості матеріалів збільшення жорсткості пропорційне товщині. Це означає, наприклад,

що подвоєння товщини робить матеріал у 8 разів жорсткішим і прогинається лише на 1/8 під тим самим навантаженням.

В роботі [7] оглянуті базові матеріали плівки, що придатні до використання, а саме поліестер (ПЕТ), поліімід (ПІ), поліетиленнафталат (ПЕН), полієфірімід (ПЕІ) і різні фоторполімери (ФП) і сополімери, полідихлорсиленометан (ПДСМ).

Поліімідні плівки є найбільш популярними завдяки гарному поєднанню електричних, механічних, хімічних і термічних властивостей. Серед них ПІ є перспективним матеріалом завдяки своїй видатній термостійкості, стійкості до корозії та механічній гнучкості, який може працювати в дуже гарячих (холодних) та/або жорстких умовах згинання [6].

ПЕН і ПДСМ також є поширеними матеріалами підкладки з чудовою гнучкістю, розтяжністю та легкою підготовкою. Варто відзначити, що інші електронні матеріали можуть бути легко закріплені на поверхні підкладки ПДСМ, виграючи від високої адгезії, спричиненої УФ. У випадку ПЕТ його низька вартість і висока оптична прозорість роблять його економічною вигідною провідною підкладкою. Різні властивості вищевказаних матеріалів узагальнено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Основні властивості матеріалів для виготовлення підкладок. Із роботи [7]

Назва матеріалу	ПЕТ	ПЕН	ПЕС	ПІ	ПВА	ПЕ	ПДСМ
$T, ^\circ\text{C}$	78	121	233	410	80	-78	-125
Коефіцієнт розширення, $10^{-6} / ^\circ\text{C}$	15	13	54	60	123.62	22	61.5
Прозорість, %	89	87	90	91	92	91	100
Адсорбція вологи, %	0.14	0.14	1.4	1.8	40	0.01	0.01
Модуль Юнга G_{pa}	5.3	6.1	2.2	2.5	2.4	1.2	0.002
Сила на розрив, МПа	225	275	83	231	64	27	12
Густина, г/см^{-3}	1.4	1.36	1.37	1.4	1.27	0.97	0.97
Показник заломлення	1.66	1.75	1.66	-	1.52	1.54	1.41

Окрім згаданих вище матеріалів підкладки, експоненціальне зростання

електронних відходів (понад 90% підкладки) стимулює дослідження екологічно чистих та біологічно розкладаних матеріалів підкладки. Наприклад, електронні пристрої на легких, екологічно чистих паперових підкладках з роботи [8, 9], що зображені на рисунку 1.2 мають хорошу гнучкість (радіус кривизни 0,3 мм) і низьку вартість (менше 0,25 доларів США за пристрій). Желатинові субстрати створюють гнучкі світловипромінювальні та резистивні накопичувачі, які можуть руйнуватися у воді та ґрунті .

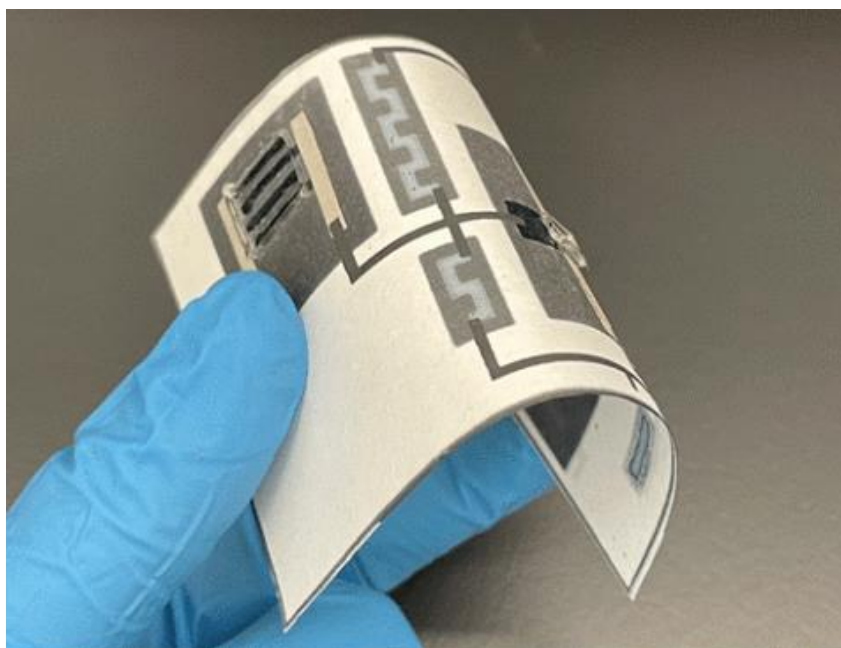


Рисунок 1.2 – Схема виготовлена на екологічно чистій паперовій підкладці. Адаптовано із роботи [8]

1.1.2. Сполучні матеріали підкладок

Для гарної адгезії матеріалів підкладки дуже важливими є сполучні матеріали. Коли йдеться про термостійкість, клей зазвичай є обмежуючим фактором у якості міцності підкладки, особливо якщо основу становить поліімід. Через минулі проблеми з поліімідними адгезивами багато гнучких поліімідних схем тепер використовують адгезивні системи з різних родин полімерів. Проте деякі нові термопластичні поліімідні клеї важливі провідникового шару. Як і основа

підкладки, клеї доступні різної товщини. Вибір товщини зазвичай залежить від застосування. Наприклад, з роботи [9] ми можемо дізнатися про підготовці покривного листа зазвичай використовують клей різної товщини, щоб задовольнити вимоги до заповнення різної товщини мідної фольги, які можуть зустрічатися.

Невід'ємною частиною для повноцінної схеми є провідники. Найчастіше вони можуть виготовлятися способом напилення або вже готових шарів з фольги різних металів які можуть мати високу оксидну стійкість або гарну провідність і навпаки. Широкий вибір товщини металеві фольги доступний для вибору та створення гнучких схем, але мідна фольга корисна майже для всіх застосувань гнучкої схеми. Висока ціна міді порівняно з її фізичними та електричними властивостями робить її чудовим вибором. Існує багато різних видів мідної фольги. Визначивши основні положення з роботи [10] ми дізнаємося, що існує вісім типів мідної фольги для друкованих плат, розділених на дві великі категорії: електроосаджена та формована, кожна в свою чергу складається з чотирьох підтипів. Вона служить різним цілям для різних кінцевих продуктів. Більшість мідних фольг зазвичай мають тонку обробку поверхні з одного боку фольги для покращення адгезії до основної фольги. Мідну фольгу можна умовно розділити на два типи: неоднорідну (катану) і електронаплавлену, при цьому їх властивості істотно відрізняються. Згорнуті та відпалені фольги є найпоширенішим вибором, але плакована тонша фольга стає все більш популярною.

1.2. Функціональні приладові структури на основі тонких плівок

1.2.1. Напівпровідникові структури на основі гнучких підкладок

На сьогоднішній день при виробництві більшості обчислювальних пристроїв використовується кремній, він вважається другим елементом поширеності після кисню. Кремнієві породи у різноманітних формах залягають у скелях, глині, піску, глибоких шарах ґрунту але з плином часу всі хочуть досягти мініатюризації

Традиційна електроніка, як інтегральні схеми або сонячні батареї, зазвичай побудована на товстих негнучких підкладках. Натомість гнучку електроніку, створену на підкладках, таких як пластик або металева фольга, можна складати, загортати, згортати та скручувати з незначним впливом на її електронні функції тому в майбутньому вона займе основне місце.

В роботі [11] показана технологія яка полягає у способі з'єднання шарів гнучких підкладок між собою. Для цього, як і у випадку зі звичайними жорсткими платами, у певних місцях певних шарів створюються перехідні отвори. Оскільки отвори повинні бути невеликими і розташовуватись точно, дослідники випалювали їх лазерним променем. Після цього в отвір за допомогою трафаретного друку заливається припій зі сплаву, що з'єднує два контакти, що проводять. Фото плівкового приладу зображено на рисунку 1.3

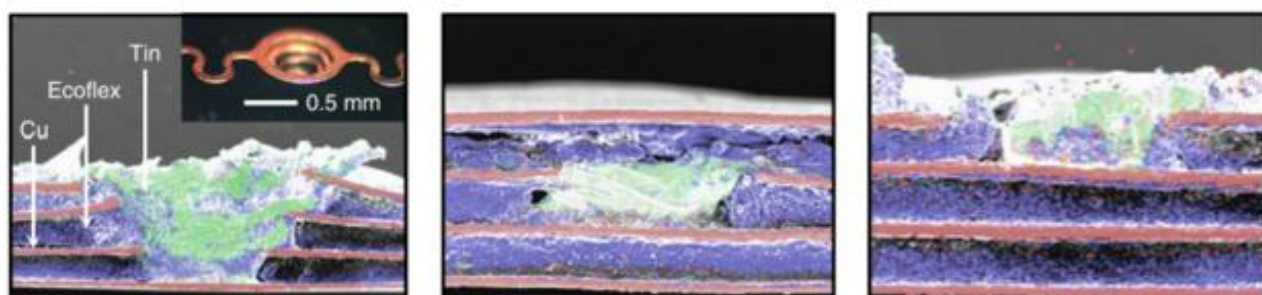


Рисунок 1.3 – Фото структури плівкового пристрою з технологією яка полягає у способі з'єднання шарів між собою. Адаптовано із роботи [11]

Дослідники продемонстрували застосування методу на декількох багатошарових прототипах. Зокрема, інженери створили багатофункціональний пристрій з датчиками розтягування, гіроскопом, акселерометром, термометром, Bluetooth-передавачем та кількома іншими компонентами. Пристрій можна безпечно прикріпити до шкіри без будь-якого клею – він закріплюється за рахунок сил Ван-дер-Ваальса. Інженери показали, що з допомогою такого пристрою можна вимірювати кілька фізіологічних показників. Наприклад, його можна застосовувати для вимірювання температури тіла, запису рухів і частоти дихання, а також як електрокардіограф, що зображено на рисунку 1.4.

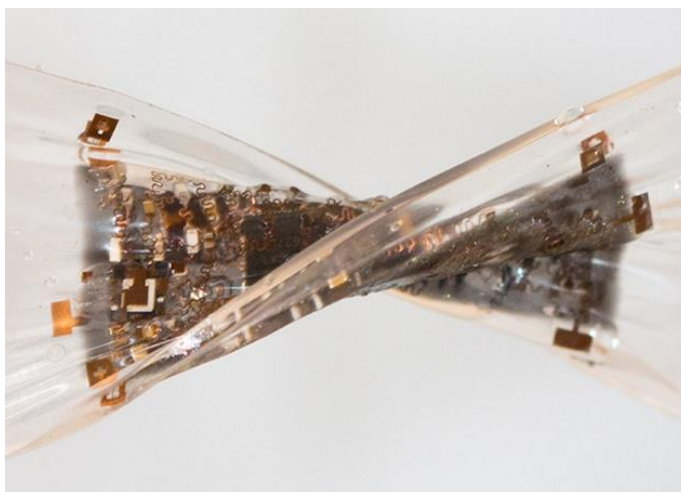


Рисунок 1.4 – Фото електрокардіографа. Адаптовано із роботи [11]

Інший спосіб використання плівкових технологій було розглянуто в статті [12] де була представлена робота готових пристроїв таких, як термоелектричний генератор на рисунку 1.5 з його характеристиками і мікро-Li-Ion батареяка, що зображена на рисунку 1.6.

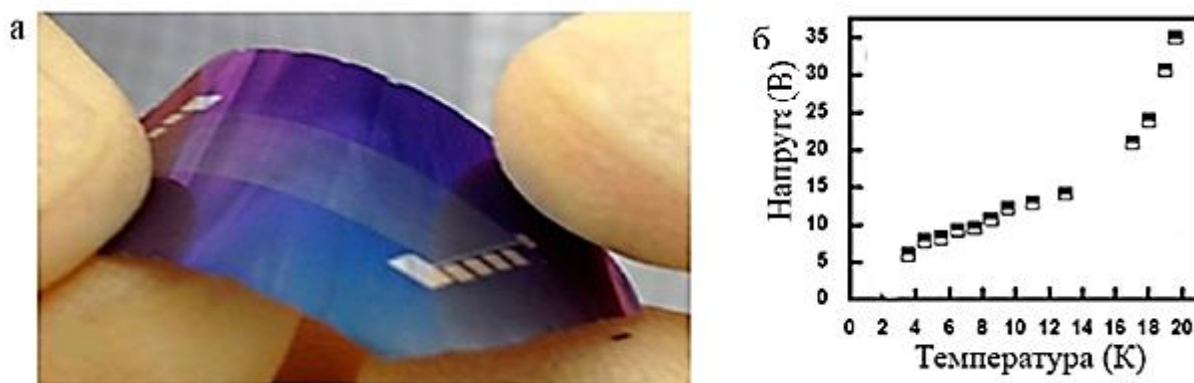


Рисунок 1.5 – Фото та параметри термоелектричного генартора: фото термоелектричного генартора (а) Залажність напруги від температури(б). Із роботи [12]

Говорячи про вартість, автори пишуть, що всі процеси, що задіяні у виготовленні, рівнозначні тим, що використовуються на звичайному виробництві, за винятком одного – реактивного травлення за допомогою XeFe_2 з наступним відділенням пластини.

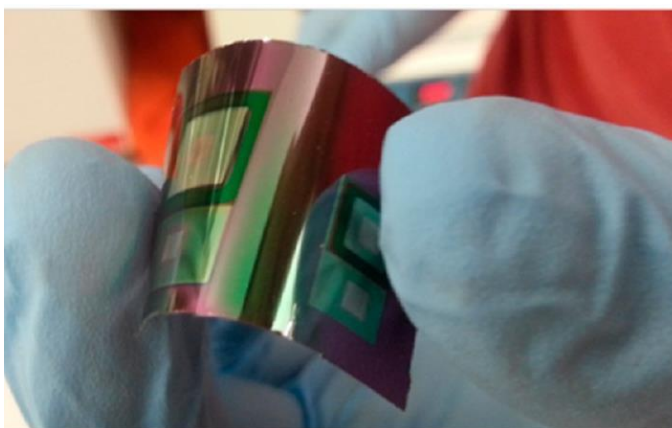


Рисунок 1.6 – Мікро-Li-Ion батарејка з використанням XeFe_2 . Із роботи [12]

Однак на 18 cm^2 пластину витрачається близько 2 г цієї сполуки (100 циклів, 30 с/цикл). Враховуючи вартість у 8 \$/г, виходить, що вся процедура травлення виходить у $0.88\$/\text{cm}^2$, що не так вже й мало. За допомогою рекуперація Хе -можливо хоча б часткова - дозволити знизити витрати. До того ж, утончення підкладки дозволить суттєво економити матеріали.

В роботі [13] показана мультифероїчна магнітоелектрична (МЕ) система. Це привабливий клас багатофункціональних матеріалів, які демонструють як феромагнітний, так і сегнетоелектричний порядок одночасно. Здатність МЕ матеріалів контролювати сегнетоелектричну поляризацію через магнетизм. Електричні поля відкривають перспективні застосування в галузі зчитувальних пристроїв для електрозапису магнітних запам'ятовуючих пристроїв. Дані пристрої виготовляються за допомогою різних технологій, починаючи від багат шарових схем і закінчуючи наноструктурованими тонкими плівками для датчиків магнітного поля, які можуть замінити низькотемпературні надпровідні квантові інтерференційні пристрої з не високою чутливістю, та не низьким енергоспоживанням.

Зовнішні магнітоелектричні властивості композитних гетероструктур можуть бути досягнуті шляхом ретельного вибору та оптимізації як магнітострикційних, так і п'єзоелектричних компонентів відносно один одного. Ці гетероструктури є п'єзоелектромагнітними. Дані пристрої мають величезний МЕ-коефіцієнт $\alpha E = 52 \text{ В (cm}^{-1} \text{ Oe}^{-1})$ та дуже низький еквівалентний магнітний шум $5,1 \text{ пТл Гц}^{-1/2}$

при 1 Гц. Дана гетероструктура МЕ виготолюється на основі гнучких магнітострикційних сплавів та монокристалів $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}) - \text{PbTiO}_3$ у вигляді фольг. Продуктивність цих пристроїв значною мірою залежить від величезного п'єзоелектричного магнітного коефіцієнта, який є результатом його величезного магнетизму. Пристрої з даних матеріалів мають не тільки п'єзоелектричний коефіцієнт, але й чудову механічну гнучкість, що продемонстровано на рис. 1.7.

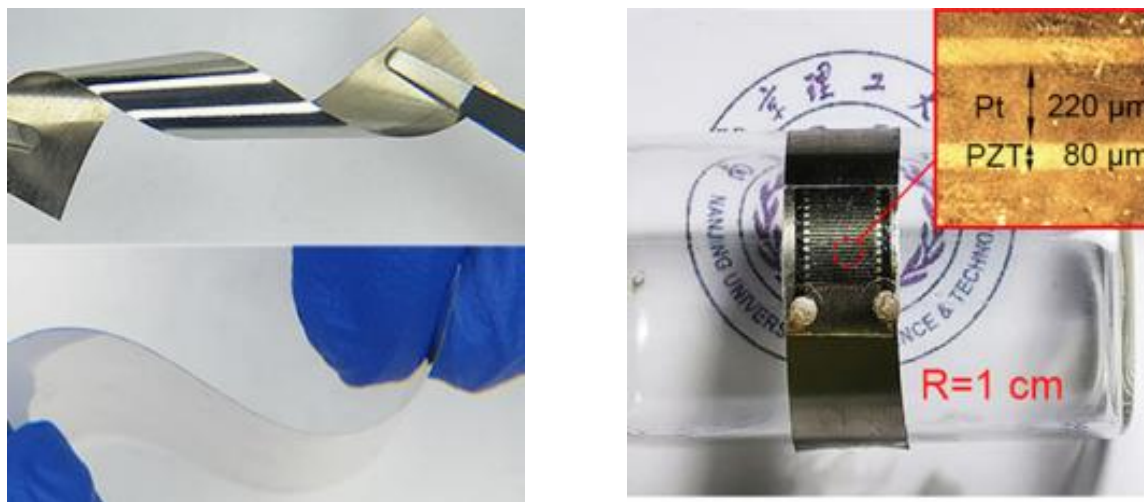


Рисунок 1.7 – Пристрої на основі мультифероїчна магнітоелектричної системи. Адаптовано із роботи [13]

У статі [13] були зроблені спроби доопрацювати тобто епоксидувати органічні п'єзоелектричні матеріали гнучкими магнітострикційними фольгами. Системи на основі гнучкого полівініліденфториду та його співполімерів вважаються найпопулярнішим підходом через їхню значну реакцію на МЕ, а також їх низьку вартість і простоту виробництва. Нещодавно в 2018 р. були запропоновані органічні біополімерні магнітоелектричні композити на основі целюлози з чудовою гнучкістю, МЕ-коефіцієнт лише $1,5 \text{ В см}^{-1}$. Оскільки товщина плівки тонша, а механічна міцність покращена у літературі, показують великий потенціал для гнучких багатошарових сенсорів МЕ. Гетероструктурні плівки МЕ мають низький коефіцієнт МЕ і механічна характеристики. Єдиний обмежуючий фактор реалізація гнучкого МЕ датчика з керамічними клітками на основі перовскіту.

Результатами дослідників з роботи [14] стало створення нового гнучкого і прозорого транзистора на основі дисульфиду молібдену. Транзистори були отримані за допомогою одного з варіантів хімічного осадження з газової фази. Ця розробка описана в журналі Nature Electronics. Автори цієї статті вважають, що двовимірні матеріали, такі як дисульфід молібдену, можуть бути використані як будівельні блоки для майбутньої гнучкої електроніки. У своїй роботі вчені хотіли розробити гнучкі, прозорі та масштабовані електронні прототипи на основі останніх досягнень епітаксії (вирощування) високоякісних моношарів MoS₂ на підкладках.

Розроблений у Китаї транзистор був виготовлений шляхом перенесення одного шару MoS₂ на гнучку підкладку. Такі шари виготовляються з використанням стандартних мікрофабрик і легко виготовляються масово. Дослідники використовували адаптовану версію широко використовуваної методики атомно-шарового осадження для покриття поверхонь тонкими плівками. Альтернативний процес покращив однорідність шару діелектрика транзистора (Al₂O₃). Крім того, дослідники використовували багат шарові системи Au/Ti/Au як контактні електроди витоку та стоку для досягнення хорошого електричного контакту. Отриманий чіп нового транзистора виглядає як прозора гнучка плівка та зображений на рисунку 1.8.

Водночас дані транзистори характеризуються високими густинами струму (~35 мкА) і рухливістю носіїв заряду (~55 см²). Важливо відзначити, що щільність пристрою становить близько 1500 транзисторів на см², що набагато вище, ніж у попередніх конструкціях. Крім того, дослідники змогли створити різноманітні гнучкі інтегральні логічні схеми, включаючи інвертори, оперативну пам'ять і п'ятирівневі кільцеві генератори, використовуючи той самий процес виготовлення.

Мікросхеми, зроблені з новими транзисторами, можна багаторазово згинати, а пластини досить гнучкі, щоб обернути їх навколо пальця.

При згинанні в дугу структура не втрачає своїх властивостей, але важливо створити гострі кути. У майбутньому цей метод допоможе виробляти тонші, компактніші та технологічніші гнучкі електронні пристрої, ніж сьогодні.

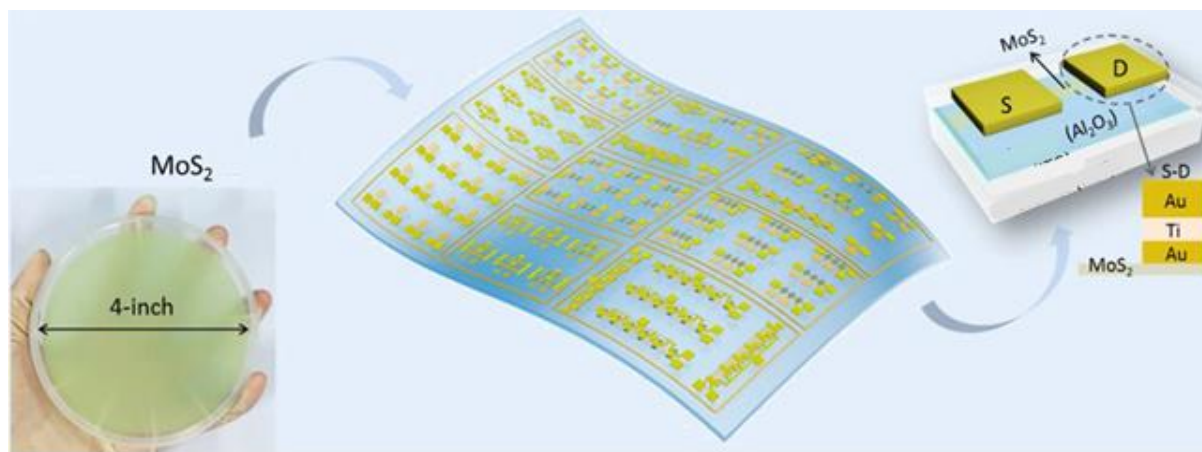


Рисунок 1.8 – Транзистор виготовлений шляхом перенесення одного шару MoS_2 на гнучку підкладку. Адаптовано із роботи [14]

Нові транзистори є хорошою основою для розумного електронного одягу, електронних корпусів і подібних систем. У наступному дослідженні вчені намагаються оптимізувати процес росту шарів MoS_2 , щоб покращити їх якість. Крім того, вони планують ще більше покращити продуктивність пристрою та дослідити більш перспективні застосування транзистора, такі як гнучка пам'ять, різноманітні сенсори та фоторецептори.

В свою чергу в роботі [14] була продемонстровані результати конференції International Electron Devices Meeting, що пройшла в Сан-Франциско, IBM представила нову і відносно недорогу технологію виготовлення кремнієвої електроніки на гнучкій пластиковій підкладці. З одного боку це вказує на незначне зниження продуктивності транзисторів у процесі виробництва, але з іншого дослідження доводять, що гнучка і доступна техніка все-таки може створюватися зі звичайними процесами при кімнатній температурі. Фото транзистора зображено на рисунку 1.9. За словами Давуда Шар'єрді співробітника дослідницького центру, під час тестування інших одно- та двовимірних матеріалів у гнучкій електроніці виникали такі проблеми як високий контактний опір та ненадійна ізоляція затвора.

Крім того, інші методи вимагають або нестандартних процесів та матеріалів, або потребують високих температур у процесі виробництва. Підхід IBM, заснований на контрольованому сколюванні або відшаровуванні, був описаний на

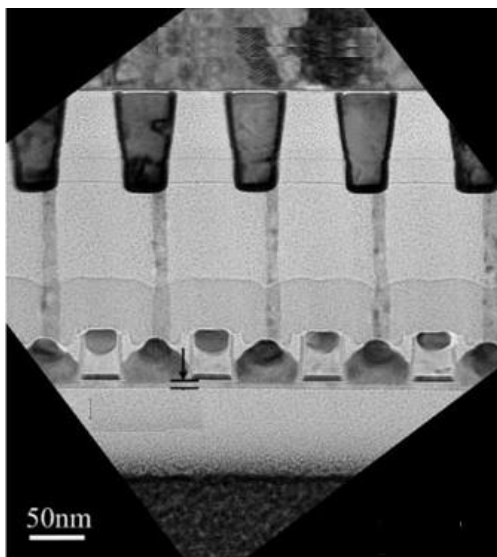


Рисунок 1.9 – Фото транзистора за допомогою просвічуючої мікроскопії. Адаптовано із роботи [14]

початку цього року як техніка «kerfless» для видалення кремнію, германію та III-V шарів, яка використовувалася IBM як доказ можливості виготовлення малопотужних фотоелектричних батарей. Цей підхід є, хоч як це дивно, простим. Підкладка з мікросхемами сколюється та переноситься на гнучку пластикову стрічку. В результаті виходить пристрій із довжиною затвора менше 30 нм та кроком затвора 100 нм. За словами фахівців з IBM, їм вдалося досягти найкращих характеристик для гнучких схем SRAM-пам'яті з напругою $V_{DD} = 0,6$ В та кільцевого генератора з періодом затримки 16 пс при живленні 0,9 В. Процес полягає в наступному: все починається з підкладки, на яку виділяється стресор-шар нікелю завтовшки приблизно 5-6 мікрон. (ІС виготовлені за 22-нм CMOS-технологією з використанням ETSOI-пластин діаметром 300 мм).

Поверх стресор-шару наносять шар еластичної поліімідної стрічки. Далі за кімнатної температури з одного краю підкладки вчені провокують «стрес-розрив» і поширюють по всій поверхні підкладки «механічно керований» фронт розлому. IBM використовує технологію ETSOI з двох причин. Перша – ультратонка товщина підкладок (60 ангстрем), що дозволяє масштабувати процес нижче 30 нм і досягати високої густини елементів схеми. Друга – наявність нелегованих каналів

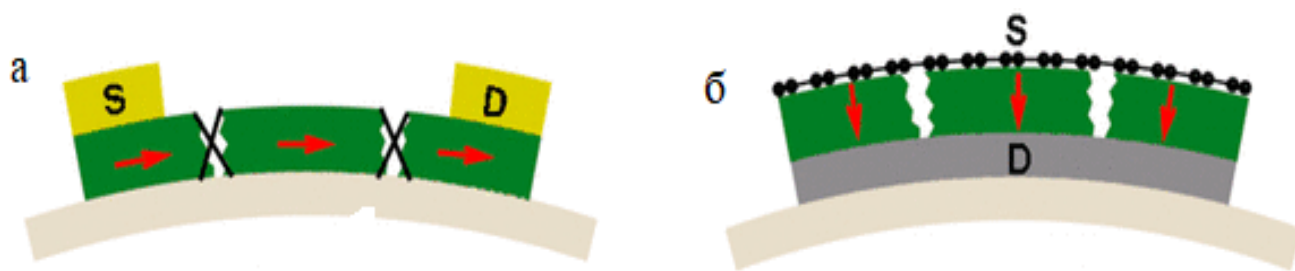


Рисунок 1.10 – Структура транзистора: планарна (а), вертикальна на тонкій підкладці (б). Адаптовано із роботи [15]

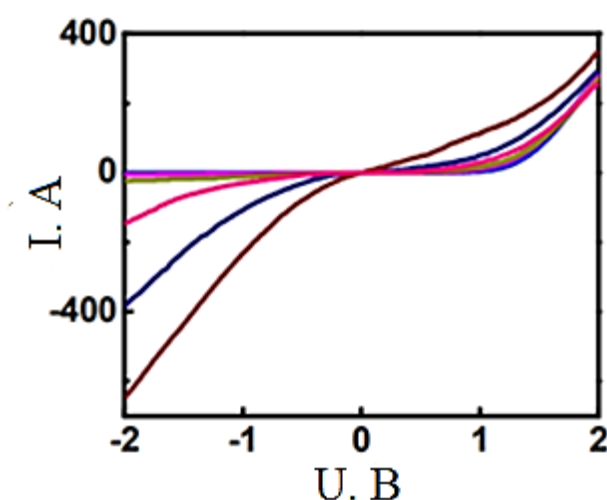


Рисунок 1.11 – ВАХ вертикального транзистора. Адаптовано із роботи [15]

транзисторів знижує нерівномірність розподілу домішок, що допускає значний розкид значень напруги на чіпі.

Додадково автори статті [15] показана технологія тонкоплівкових транзисторів, що мають центральне значення для різноманітних електронних і особливо макроелектронних застосувань. Нова конструкція високочучких вертикальних транзисторів із чудовими електричними характеристиками та механічною міцністю зображені на рисунку 1.10. Використовуючи графен як контакт із регульованою функцією виходу для тонкої плівки аморфного оксиду індію, галію, цинку (IGZ), вертикальний потік струму через з'єднання графен–IGZO можна ефективно модулювати зовнішнім потенціалом затвора.

Унікальна архітектура вертикального транзистора може легко включати

пристрої з ультракоротким каналом з дуже високим струмом доставки та винятковою механічною гнучкістю. ВАХ даного транзистора зображена на рисунку 1.11.

1.2.2. Імпланти на основі гнучких підкладок

Авторами статті [16] показана технологія роботи біонічного вуха яке зображене на рисунку 1.12. З унікальною жорсткістю та геометрією, тонка плівка у поєднанні з масивами датчиків тиску діє як біоміміка слухової системи. З певною частотою і силою звукового тиску базальна мембрана вібрує з певною попередньо визначеною амплітудою. Мікрочіп датчик тиску можна активувати для кожного конкретного розташування, випромінюючи сигнал відомої висоти та гучності, імітуючи звук. Такі механізми зворотного зв'язку можуть коливатися, так що вона вібрує дедалі сильніше за певним частота, яка може посилити сигнал, одночасно скасовуючи інший з проксимальною частотою. В порівняння з поточним кахлеальним імплантатом цей механізм забезпечує набагато більшу частоту та рівень звуку бути відчутним, подібно до справжнього вуха.

Подальше застосування мікрочіпових систем на основі гнучких технологій це штучні нюхові та язикові рецептори. Рецептори нюхової і смакової систем розпізнають специфічні хімічні властивості, такі як кислотність, солоність і спорідненість ферментів, а також рівні смаку або запаху. Кислі, солоні та солодкі підтипи розрізняють наступним чином: рН, іони лужних металів або кальцію . Ці параметри можна отримати за допомогою сучасних аналізаторів електричного опору. Молекулярні сполуки, такі як цукри стає чимось вимірюваним за допомогою ферментів і перетворювачів електричного сигналу.

Підшкірна імплантація таких тонких плівок як датчиків моніторингу рН, температури, тиску або специфічний датчик ферментів. Використання таких систем дозволяє відстежувати аналіз крові пацієнта та визначати цінні дані. Також це актуально до поранених наприклад для отримання інформації про тиск або кількість кисню в крові наприклад, він якщо такий датчик буде вбудований в бандаж.

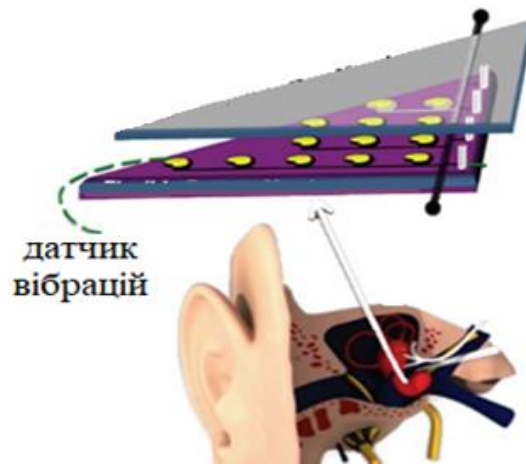


Рисунок 1.12 – Імплант біонічного вуха на основі плівкових структур. Адаптовано із роботи [16]

Крім того, з точки зору медичних технологій, гнучкі електронні схеми можуть бути приєднані поза тілом людини для діагностичних цілей та засобів моніторингу. Наприклад, тепло, вологість, датчиків солі або тиску можна використовувати як простирадла та контролювати своїх пацієнтів у реальному часі. Розподіл температури тіла, швидкість потовиділення та частота скорочень серця або постуральний тиск. Будь-яка частина тіла може надати важливу інформацію про патологічні симптоми або стадії одужання. Гнучкі мембрани також можуть відігравати важливу роль у розшифровці психічних процесів, що відбуваються в мозку. Основи нейронних мереж та їх розуміння вплив на індивідуальну фізіологію та поведінку.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

2.1 Методика і техніка отримання зразків

2.1.1. Огляд установки та параметрів для виготовлення зразків

Для отримання дослідних зразків, дослідження фізичних властивостей, функціональних параметрів гнучких металевих чутливих елементів використовувалася вакуумна установка ВУП-5М (рис. 2.1). Всі плівки, що були виготовлені термічно конденсували у вакуумі (10^{-4} Па) на поліровані пластини ситалу, гнучкі пластикові стрічки за температури підкладки $T_{\text{п}} = 300\text{--}500$ К. Швидкість конденсації $\omega = 0,1\text{--}0,2$ нм/с. Дослідження параметрів тонкоплівкових зразків проводилися при різних температурах відпалу $T_{\text{в}} = 300\text{К}$ та 600К . Зовнішній вигляд ВУП-5М зображено на рисунку 2.1, робоча область з схемою розміщення випарників показана на рисунку 2.2.



Рисунок 2.1 – Зовнішній вигляд вакуумного універсального поста ВУП-5М

Тонкі плівки отримувалися або звичайним термічним випаруванням із вольфрамових випарників, або методом електронно-променевого випарування за допомогою електронно-променевої гармати.

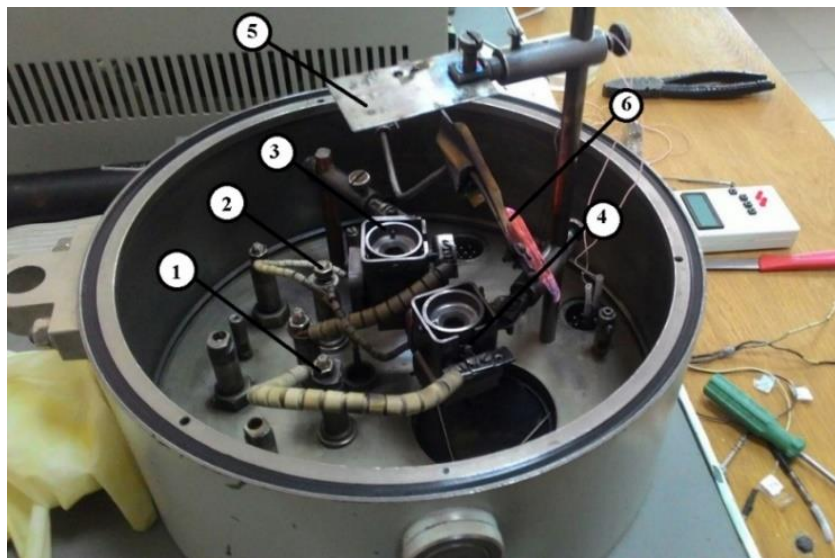


Рисунок 2.2 – Зовнішній вигляд камери для електронно-променевого випарування: 1, 2 – випарник ; 3, 4 - електронні випарники; 5 – столик; 6 – заслінка [19]

2.1.2. Дослідження товщини методом кварцевого резонатора

Товщина шару вимірюється методом кварцевого генератора, що зображено на рисунку 2.3. Власна частота кристала не змінюється, коли він стабільний, але під час осадження вона змінюється на кілька Гц на 1 нм. Даний тип датчика показує, що чутливість методу кварцевого резонатора дуже висока. Однак при реалізації цього методу необхідно враховувати низку його особливостей, а саме пружні властивості напильної речовини відрізняються від пружних характеристик кварцу. Щільність у тонкому шарі напильної речовини менша за щільність цієї речовини в масивному зразку. Зсув частоти резонансу обумовлений не лише масою нанесеного шару, але також і напругами, що виникають на межі кварц-напильний матеріал.

Для точнішого розрахунку товщини плівки було використане співвідношення 2.1.

$$d = \frac{N_a \cdot D_q}{D_f \cdot f_q^2} \cdot (f_q - f) \quad (2.1)$$

де D_q – щільність кварцу, а D_f – щільність речовини. f_q — резонансна частота кристала до конденсації металу. f – резонансна частота кристала після конденсації.

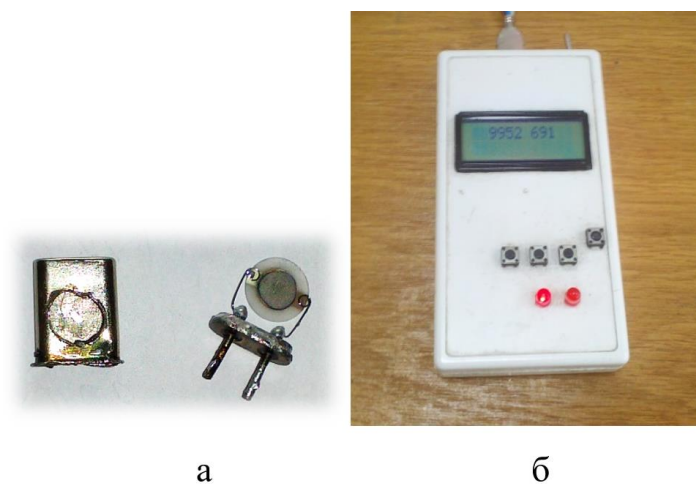


Рисунок 2.3 – Прилад для контролю товщини плівки: а – кварцевий резонатор; б – частотомір [22]

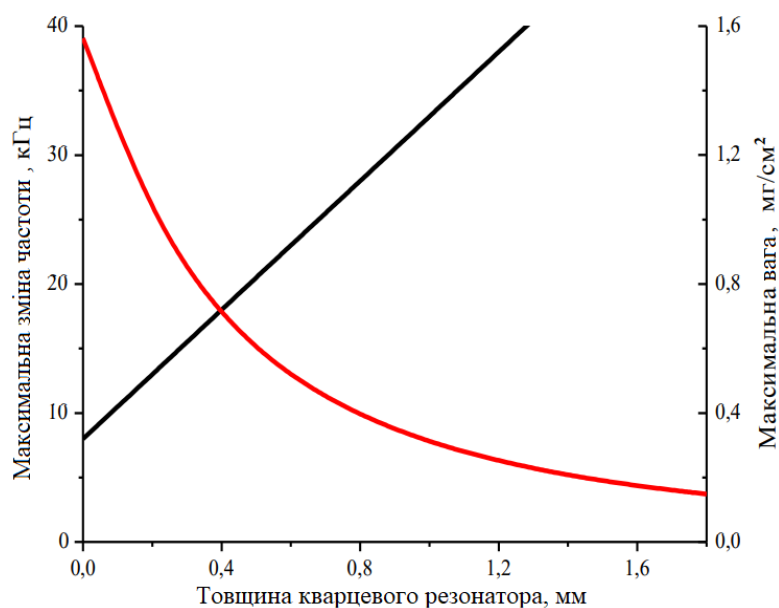


Рисунок 2.4 – Залежність максимальної зміни частоти та величини максимальної реєстрованої маси від товщини пластини [21]

При виборі кварцового датчика враховувалися такі чинники (рис. 2.4) необхідно вибрати оптимальну товщину датчика для найбільш точного вимірювання частоти, а отже, і для реєстрації мінімальної зміни маси, що суттєво підвищує чутливість методу.

Як основа використовувалися різні підкладки в залежності від подальшого методу аналізу зразків. Для контролю фазового складу та структури зразка використовували гнучку підкладку у вигляді вуглецевої плівки товщиною 20 нм.

2.2 Методика дослідження магніторезистивних властивостей тонких плівок

Магнітоопір (МО) досліджуваного зразка розраховується за співвідношенням 2.2 на основі отриманих експериментальних даних:

$$MO(B) = \frac{\Delta R}{R_0} = \frac{(R_B - R_0)}{R_0}, \quad (2.2)$$

де $MO(B)$ – відносна зміна магнітоопору. ΔR – зміна електричного опору, що розраховується як різниця $(R_B - R_0)$ між поточним значенням магнітного поля B і відсутністю зовнішнього магнітного поля [17, 18].

В ході експериментів використовувався автоматизований комплекс для дослідження магніторезистивних властивостей вентиляційної системи вимірювання на рисунку 2.5 наведено зовнішній вигляд комплексу та блок-схему на рисунку 2.6.

Автоматизований комплекс складається з електромагніту, джерела живлення уніполярного електромагніту Philips PM 2811, цифрового мультиметра Keithley 2000 для вимірювання опору та 12-розрядного АЦП-ЦАП, що працює по NI USB 6008. Персонального комп'ютера з встановленим пакетом програм.

Дослідження МО проводили за чотириточковою схемою, тримач для зразків зображений на рисунку 2.7. Він дозволяє вимірювати МО зразка у трьох геометріях вимірювання при кімнатній температурі.



Рисунок 2.5 – Зовнішній вигляд автоматизованого комплексу для дослідження магніторезистивних властивостей [20]

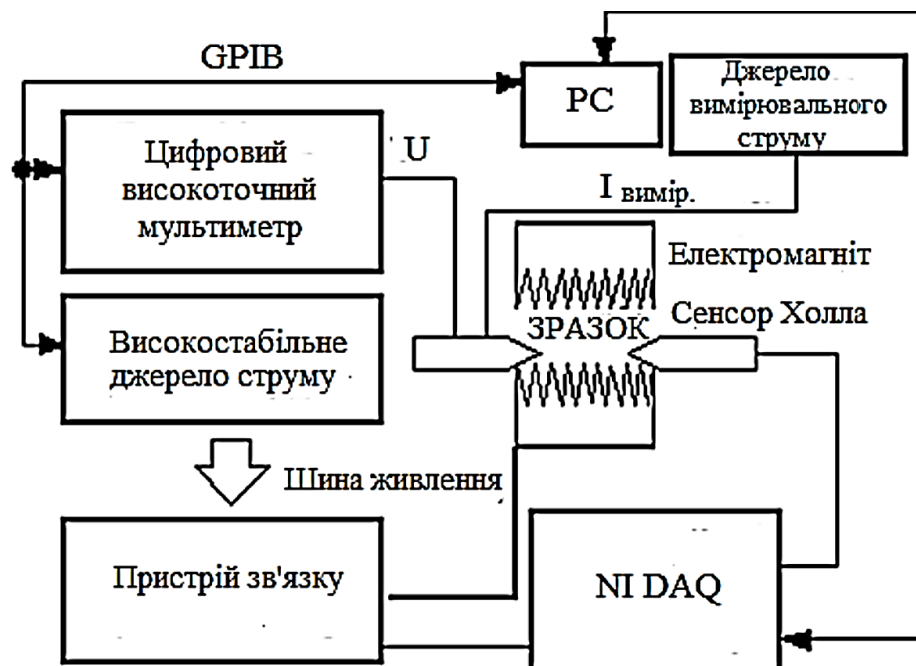


Рисунок 2.6 – Блок-схема системи для дослідження магніторезистивних властивостей плівок із застосування джерела вимірювального струму [20]



Рисунок 2.7 – Тримач для вимірювання МО [20]

При дослідженні магніторезистивних властивостей плівкового зразка враховувалися три взаємні напрямки магнітного поля B і площини зразка зі струму, що протікає через нього.

На основі значень МО, отриманих від індукції магнітного поля, були побудовані відповідні залежності для розрахунку магніточутливості системи спінового клапана. Це впливає зі співвідношення 2.3:

$$S_B = \left| \frac{(\Delta R / R(B_S))_{\max}}{\Delta B} \right| \quad (2.3)$$

де B_S – максимальне значення магнітоопору; ΔB – зміна магнітної індукції від насичення (або максимальної величини) B_S до розмагнічування [19].

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ ТРИШАРОВИХ ПЛІВКОВИХ ЗРАЗКІВ СПІН-ВЕНТИЛЬНОГО ТИПУ

3.1. Вихідні дані

Під час дослідження вихідної плівкової системи спін-залежного розсіювання електронів (СЗРЕ) в одно- та багат шарових плівках була взята до уваги структура, що складається з трьох шарів типу Fe/Au/Fe/П, де Fe – феромагнітний шар, а Au це немагнітний шар. Для розрахунків також були розглянуті довідникові дані досліджень магніторезистивних властивостей (МО) двох типів зразків. Для першого зразку була взята структура, що складається з Fe(5)/Au(d_{Au})/Fe(5)/П (де П – підкладка на основі ситалова, $d_{Au} = 3-10$ нм – немагнітний шар). Другим зразком виступала плівкова структура Fe(15)/Au(d_{Au})/Fe(15)/П ($d_{Au} = 3-10$ нм). Схематична будова структури зразка на основі якого проведений розрахунок, зображена на рисунку 3.1, а вихідні значення магнітоопору при різних геометріях вимірювання – у таблиці 3.1.

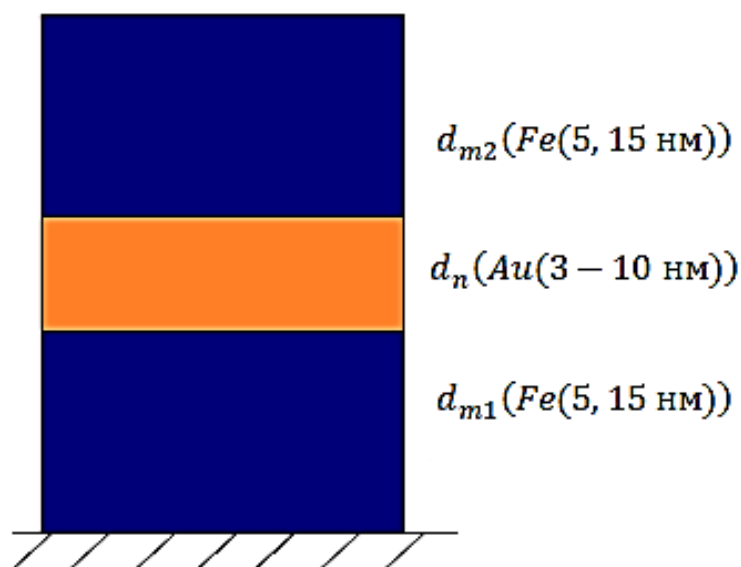


Рисунок 3.1 – Схематична структура зразка [20].

Розрахунок величини МО проводиться за формулою:

$$MO = [R(B) - R(B_s)/R(B_s)] * 100\%, \quad (3.1)$$

де $R(B_s)$ – це електричний опір у магнітному полі якій насичений або максимально можливий до нього; $R(B)$ – значення опору плівки у поточний момент в магнітному полі.

Таблиця 3.1 – Величина магнітного опору у трьох геометріях виміру гранульованого сплаву, який уже сформований після того як пройшло відпалювання тришарових структур Fe/Au/Fe до $T_g = 300, 700$ і 900 К

Зразок	МО, %								
	поздовжн. геом.			попереч. геом.			перпенд. геом.		
	300 К	700 К	900 К	300 К	700 К	900 К	300 К	700 К	900 К
Fe(5)/Au(5)/Fe(5)/П	0,10	0,07	0,02	0,11	0,05	0,06	0,12	0,02	0,03
Fe(5)/Au(15)/Fe(5)/П	0,14	0,14	0,07	0,13	0,06	0,07	0,12	0,09	0,1
Fe(5)/Au(25)/Fe(5)/П	0,24	0,23	0,13	0,11	0,06	0,1	0,13	0,17	0,4
Fe(25)/Au(5)/Fe(25)/П	0,21	0,07	0,06	0,12	0,04	0,06	0,1	0,03	0,04
Fe(25)/Au(15)/Fe(25)/П	0,23	0,1	0,07	0,14	0,04	0,06	0,17	0,03	0,03
Fe(25)/Au(25)/Fe(25)/П	0,26	0,13	0,09	0,2	0,05	0,04	0,16	0,16	0,03

3.2 Розрахунок параметрів спін-залежного розсіювання

Розрахунок починається з побудови графіка залежності магнітоопору (δ) від співвідношення товщин немагнітного шару до магнітного. На рисунку 3.2 показаний приклад результатів наведеного вище експерименту. Це проявляється у вигляді залежності δ від нормованої на товщину d_m товщини немагнітного шару d_n .

Аналізуючи залежність, зображену на рисунок 3.2 знаходимо, що амплітуда і магнітне відношення обох типів зразків зростають майже лінійно зі збільшенням товщини немагнітного шару d_n від 3 нм до 10 нм. За цими даними розраховуються

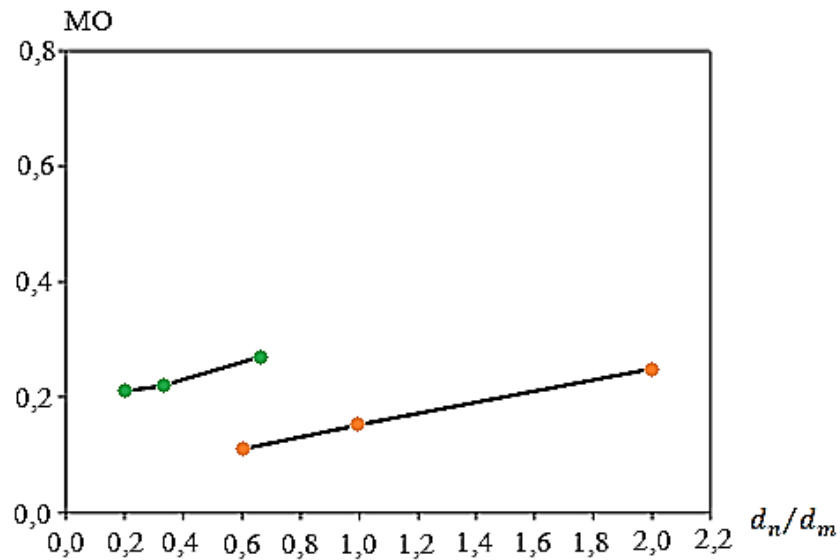


Рисунок 3.2 – Експериментальна залежність δ від товщин з немагнітним прошарком d_n однаковим на товщину d_m і базовим магнітним шаром для 2 типів зразків: для 1 – $d_m = 15$ нм, $d_n = (3-10)$ нм (●), а для 2 – $d_m = 5$ нм, $d_n = (3-10)$ нм (●) [20].

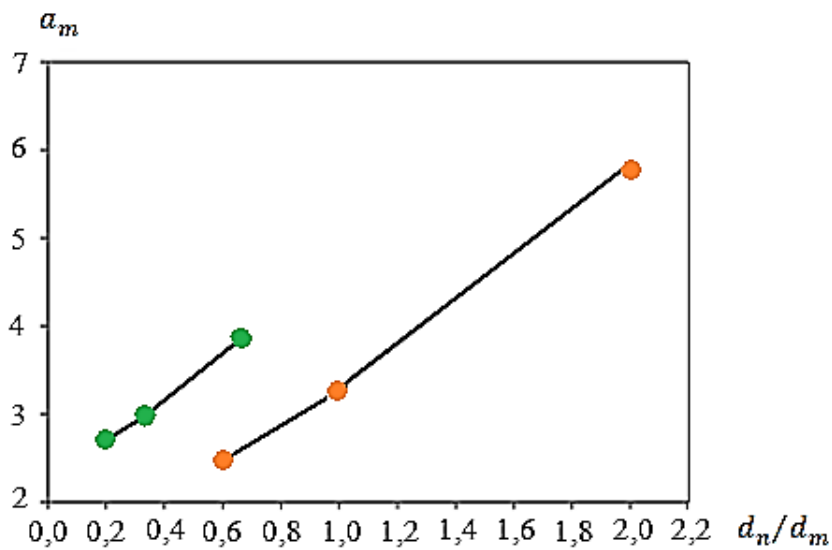


Рисунок 3.3 – Розрахункова залежність параметрів об'ємної асиметрії, та співвідношення a_m від товщини не магнітного шару d_n однаковим на товщину d_m і базовим магнітним шаром для 2 типів зразків: для 1 – $d_m = 15$ нм, $d_n = (3-10)$ нм (●), а для 2 – $d_m = 5$ нм, $d_n = (3-10)$ нм (●) [20].

параметри спін-залежного розсіяння: параметри в об'ємній асиметрії – α_m , питомого опору з більшим та з меншим носіями заряду, та параметра спінової асиметрії – β .

Наступним кроком є розарунок параметра об'ємної асиметрії α_m з використанням співвідношення 3.2:

$$\alpha_m = 1 + 2(1 + d_{n,m}) \left(\delta(d_{n,m}) + \sqrt{\delta(d_{n,m}) (1 + \delta(d_{n,m}))} \right), \quad (3.2)$$

У даній формулі величина магніторезистивного ефекту δ і величина $d_{n,m}$ поєднується з експериментальними даними які в свою чергу наведені на рисунку 3.2, а їх розрахунки були додані до таблиці 3.2.

Аналізуючи дані щодо параметра асиметрії об'єму α_m , зазначимо, що показник може в теорії змінюватися в мінімальних межах від 2,45 та в максимальних межах до 5,86 в залежності від параметри товщини плівкової системи Fe(5)/Au(d_{Au})/Fe(5)/П, а в свою чергу для ситем Fe(15)/Au(d_{Au})/Fe(15)/П в це значення становить в межах від 2,73 та до 3,83.

Потім з відомою величиною параметрів об'ємної асиметрії ρ_m і з врахуванням проміжного немагнітного шару ρ_n можна зробити висновки, що величину питомого опору на мажористих носіїв заряду ρ_m^+ (експериментальні дані шару, що є проміжним та виготовлений на основі золота наведені на рисунку 3.3), також можна розрахувати як і величину питомих опорів малих носіїв заряду ρ_m^- , та параметрів спінової асиметрії β які обчислюються за формулами 3.3 та співвідношенням 3.4.

$$\rho_m^- = \alpha_m \rho_m^+ \quad (3.3)$$

$$\beta = \frac{(1+d_{n,m}) \left(\delta(d_{n,m}) + \sqrt{\delta(d_{n,m}) (1 + \delta(d_{n,m}))} \right)}{1 + (1+d_{n,m}) \left(\delta(d_{n,m}) + \sqrt{\delta(d_{n,m}) (1 + \delta(d_{n,m}))} \right)} \quad (3.4)$$

Після розрахунку всіх параметрів за співвідношенням, що наведені раніше результати заносимо в таблицю 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати розрахунків

№ п/п	Система	МО, %	α_m	$\rho_m^- \cdot 10^{-7}$, Ом·м	$\rho_m^+ \cdot 10^{-7}$, Ом·м	β
1	Fe(5)/Au(5)/Fe(5)/П	0,11	2,47	4,00	1,62	0,42
2	Fe(5)/Au(15)/Fe(5)/П	0,15	3,26	4,40	1,35	0,53
3	Fe(5)/Au(25)/Fe(5)/П	0,25	5,85	6,44	1,1	0,71
4	Fe(25)/Au(5)/Fe(25)/П	0,21	2,71	4,40	1,62	0,46
5	Fe(25)/Au(15)/Fe(25)/П	0,22	2,97	4,01	1,35	0,50
6	Fe(25)/Au(25)/Fe(25)/П	0,27	3,85	4,24	1,1	0,59

Розрахунок залежності спінових параметрах асиметрій β від товщини не магнітного шару d_n однаковим на товщину d_m базовий магнітний шар якого для двох типів зразків представлена на рисунку 3.4.

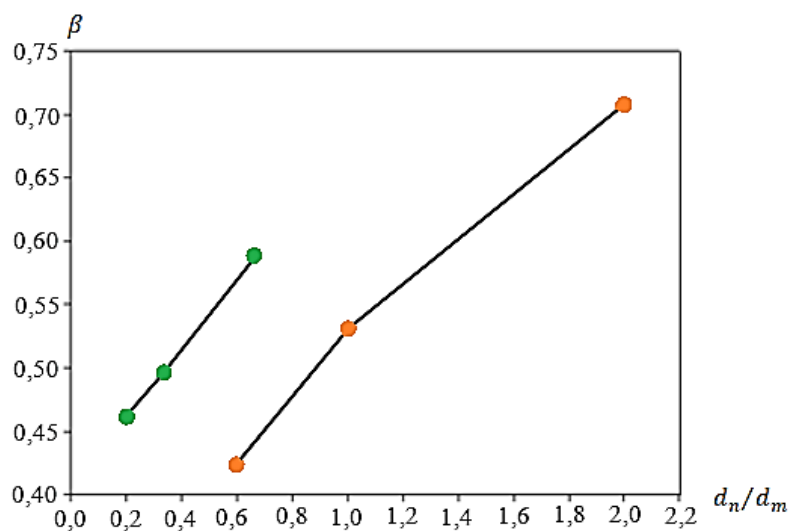


Рисунок 3.4 – Розрахункова залежність параметра спінової асиметрії β від товщин з немагнітним прошарком d_n однаковим на товщину d_m і базовим магнітним шаром для 2 типів зразків: для 1 – $d_m = 15$ нм, $d_n = (3-10)$ нм (●), а для 2 – $d_m = 5$ нм, $d_n = (3-10)$ нм (●) [20].

3.3 Структура з функціональним мультишаром $[\text{Fe}(3)/\text{Au}(3)]_n$

Формування спін-вентильних систем на основі металів можуть бути запропоновані у роботі [22] по аналогії з роботами [23, 24] структури з мультишаром $[\text{Co}(3)/\text{Cu}(3)]_n$ або $[\text{Fe}(3)/\text{Au}(3)]_n$, ($n = 3 \div 18$ – кількість повторів). При формуванні приладових систем спін-вентильного типу можна замість одного із магнітних шарів за умови збереження іншого як показано на рисунок 3.5. Суцільний шар Co або Fe у порівнянні з мультишаром характеризується високим значенням коерцитивності та буде виконує роль закріпленого магнітожорсткого шару, що дозволяє забезпечити спін-вентильний ефект. Гнучкість конструкції є результатом використання гнучкої підкладки, металева наноструктура забезпечує стабільні електричні параметри елементів при різних деформаціях. Конструктивно функціональний елемент повинен складатися з тонкої металевої багатошарової плівки як схематично зображено на рисунку 3.5.

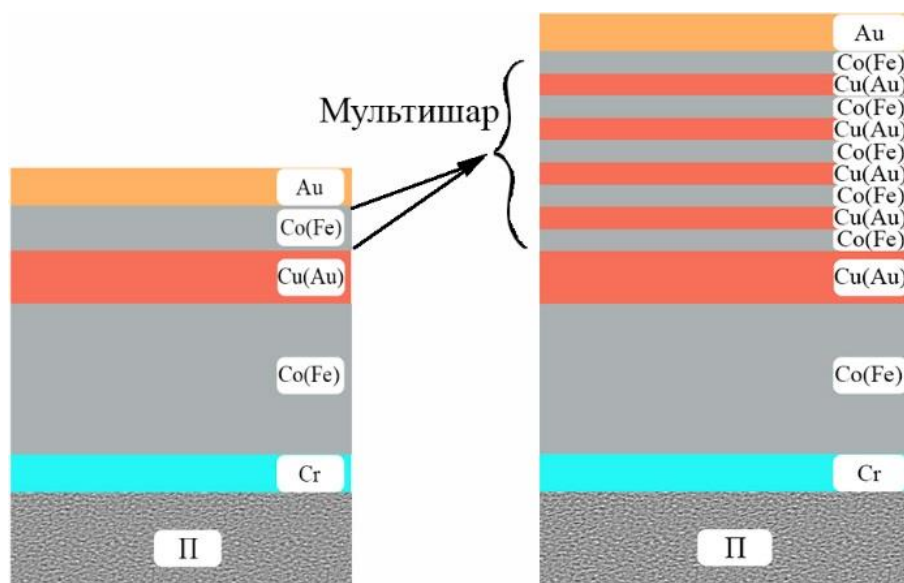


Рисунок 3.5 – Схема формування модифікованої функціональної структури на основі мультишару підкладка (П) – тефлон товщиною $0,5 \div 2$ мм, адгезійний шар – плівка Cr (3), нижній контактний шар (НКШ) – плівка Au (10), нижній функціональний магнітний шар – плівка Co (20 нм) / немагнітний прошарок – плівка Cu (6 нм) / верхній функціональний магнітний шар – мультишар $[\text{Co}(3)/\text{Cu}(3)]_n$, захисний та верхній контактний шар – плівка Au (10). Адаптовано із [25]

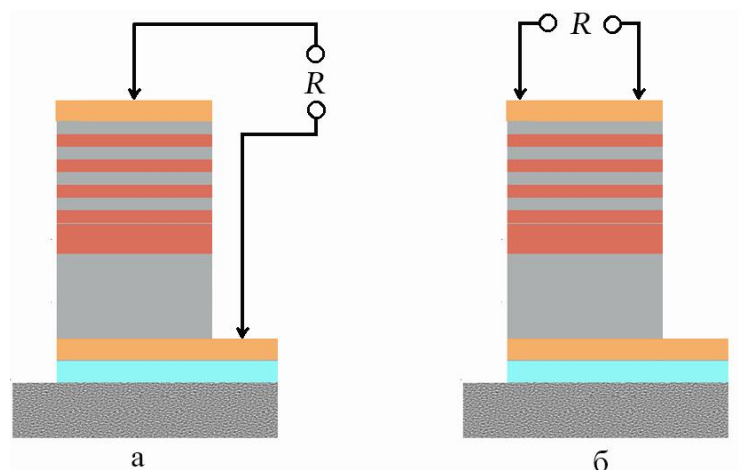


Рисунок 3.6 – Перпендикулярна (а), поздовжня (б) схеми включення функціонального елемента приладової металевої плівкової структури спін-клапанного типу з використанням мультишару. Адаптовано із [25]

Захисний шар також забезпечує захист від фізичного зовнішнього впливу, а нижній – забезпечує електричний контакт у поперечній та поздовжній геометріях пропускання струму.

Такі структури можна отримати шляхом конденсації шарів з наступною термообробкою до температури 700 К, що дозволить працювати функціональному елементу в робочому діапазоні температур 300 – 700 К. Це відбувається за рахунок високої термічної стабільності у магнітних полях від 0 – 0,5 Тл.

Товщина магнітних шарів, яка становить 6 і 20 нм є ідеальною для максимально ефективних робочих параметрів. Після формування першого шару він ще додатково проходить стадію відпалу до температури 950 К. Це дозволяє закріпити його магнітну доменну структуру та підвищити його магнітожорсткість.

На рисунку 3.6 показано можливі схеми включення функціонального елемента гнучкої електроніки спін-клапанного типу в електричне коло. Розглянуті два варіанти: перпендикулярне (а) та поздовжнє (б) пропускання електричного струму.

Функціональність такої структури забезпечується специфічними властивостями мультишару $[\text{Co}(3)/\text{Cu}(3)]_n$, які підбиралися характерними товщинами окремих шарів та режимами їх термообробки, що обумовлене чутливістю електричного опору функціонального елемента до орієнтації та напруженості зовнішнього магнітного поля та його високу термічну стабільність.

ВИСНОВКИ

По даній роботі можна зробити наступні висновки:

1. Під час виконання завдання проєкту були розглянуті основні поняття стосовно гнучкої електроніки та її використання в плівках наноромірного масштабу. Розглянуті питання стосовно виготовлення гнучких підкладок, їх матеріалів та експлуатаційних характеристик, а також отримання теоретичних результатів по дослідженню фізичних властивостей функціональних елементів спін-клапанного типу на основі Fe і Au, Co і Cu та магнітних наночастинок, що утворюються на основі осадженої термічно стабільної фази та структури із заданими експлуатаційними властивостями для створення магнітного сенсора.

2. Освоєна методика отримання та дослідження магніторезистивних властивостей тонких плівок з використанням вакуумної установки ВУП-5М та автоматизованого комплексу для дослідження магніторезистивних властивостей.

3. Розраховано параметри спін-залежного розсіювання для плівкової системи Fe/Au/Fe/П. Значення величини спінової асиметрії β в зразках Fe(5)/Au(dAu)/Fe(5)/П змінюється у межах від 0,44 до 0,75, тоді яку для системи Fe(15)/Au(dAu)/Fe(15)/П – від 0,42 до 0,62.

4. Спін-вентильна структура типу «сендвіч», що виконується за схемою «магнітний шар / немагнітний прошарок / магнітний шар – Co(Fe)(20 нм)/Au(10 нм)/[Co(Fe)(3)/Cu(3)]_n знайшла застосування в чутливих елементах гнучкої сенсорної електроніки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Zhuangjian L. Computational Mechanics for Flexible and Wearable Electronics // *Adv. Mater.* – V. 27(1). – 2018. – P. 880 – 885.
2. Zhang Y., Zhang L. Flexible Electronics Based on Micro/Nanostructured Paper // *Adv. Mater.* – V. 30(2). – 2018. – P. 1 – 18.
3. Cai L., Wang C. Innovations in polyester film substrates for the flexible electronics industry // *Nanoscale Research Lett.* – V. 10(5). – 2015. – P. 1 – 7.
4. Hirohataa K., Yamadab Y., Nakatanic I.L., Prejbeanud B., Diényd P., Pirroo B. Multilayer Substrate to Use Brittle Materials in Flexible Electronics // *J. Mag. Mag. Mater.* – V. 509(3). – 2020. – P. 166–711.
5. Chandrasekara L. B., Gnanasekarb K., Karunakaranc M. Piezoelectric materials for flexible and wearable electronics: A review // *Superlattices and Microstructures.* – V. 136(3). – 2019. – P. 106 – 322.
6. Liu Z. Computational mechanics for flexible and wearable electronics // *American Journal of Quantum Chemistry and Molecular Spectroscopy.* – V. 3(6). – 2019. – P. 41– 47.
7. Yong Z., Qijin H. Gravure Printing of Water-based Silver Nanowire ink on Plastic Substrate for Flexible // *Electron Device Letters.* – V. 32(8). – 2021. – P. 1-5.
8. Jin Z. Bio-friction / Z. Jin, D. Dowson. Nanomaterials on flexible substrates to explore innovative functions: From energy harvesting to bio-integrated electronics // *Friction.* – V. 1. – 2013. – P. 100 –113.
9. MacDonald W.A., Looney M.K., MacKerron D., Eveson R., Adam R., Hashimoto K., Rakos K., Latest Advances in Substrates for Flexible Electronics // *J. Soc. Inform. Display* – V. 15. – 2007. – P. 1075 – 1083.
10. Huang Y., Dongjun F., Jinsong T. Binding Conductive Ink Initiatively and Strongly: Transparent and Thermally Stable Cellulose Nanopaper as a Promising Substrate for Flexible Electronics // *Journal of the Society for Information Display.* – V. 15(6). – 2019 – P. 10 – 13.
11. Saleem K., Shawkat A., Amine B. Recent developments in printing flexible and

- wearable sensing electronics for healthcare applications // *J. Polymer Sci. Part B: Polymer Phys.* – V. 49(2). – 2019 – P. 18 – 20 .
12. Nagarajan Palavesam, Sonia Marin, Dieter Hemmetzberger,. Christof Landesberger,. Karlheinz Bock,. Christoph Kutter, See fewer // *IEEE Sensors Journal.* – V. 15(7). – 2018 – P. 34 – 35.
 13. Chuang Z., Evelyn C., Liming C., Yuqi W., Ben B., Yi L., Xuqing L. A Nature-Inspired, Flexible Substrate Strategy for Future Wearable Electronics // *Adv. Matr.* – V. 23(6). – 2019. – P. 15 – 16.
 14. Sankalp V., Gaganjot N., Julianne T., Monica K., Vivek V. Biodegradable photolithography compatible substrate for transparent transient electronics and flexible energy storage devices // *J. Polymer Sci. Part B: Polymer Phys.* – V. 49(2). – 2019 – P. 18 – 20.
 15. Seung H., Heng P., Costas P., Christine K., Jean M.J. Fréchet D. All-inkjet-printed flexible electronics fabrication on a polymer substrate by low-temperature high-resolution selective laser sintering of metal nanoparticles // *J. Polymer Sci. Part B: Polymer Phys.*– V. 49(2). – 2019 – P. 18 – 20.
 16. Jingsheng S., Chun X., Mary B. All-printed carbon nanotube finFETs on plastic substrates for high-performance flexible electronics // In 34th European Solid-State Circuits Conference. – California : University of California. – V. 49(2). – 2008 – P. 24.
 17. Jung H., Han E., Chang K., Hyun K., Seong K., Kwi I. Self-powered flexible electronics beyond thermal limits // *J. Matr. Chem.* – V. 20(3).– 2019. – P. 6 – 8.
 18. Yiyuan Z., Tengyuan Z., Zhandong H., Jun Y. A New Class of Electronic Devices Based on Flexible Porous Substrates // *Nanoscale.* – V. 16(5). – 2022. – P. 12 – 18.
 19. Jaroslav H., Petr K., Jiří K., Radek P. Dielectric, structural and mechanical properties of thermally aged biaxially oriented polymeric substrates for flexible electronics // *J. Mater. Chem. C.* – V. 2(6). – 2022. – P. 286 – 294.
 20. Jingsheng S., Chun X., Sankalp V., Recent developments nanomaterials on flexible substrates // *IEEE Sensors Journal.* – V. 15(7). – 2018 – P. 34 – 35.
 21. Saleem K., Shawkat A., Liu Z. A preliminary study of printed electronics through flexography impression on flexible substrates // *J. Matr. Chem.* – V. 20(3).– 2019. – P. 6 – 8.

22. Формування приладових наноструктур спін-клапанного типу на основі Co і Cu / І. В. Чешко, М. В. Костенко, В. І. Гребинаха та ін. // Журнал нано-та електронної фізики. – 2016. – Т. 8, № 3. – С. 03041(4).
23. Magnetoresistance and Anomalous Hall Effect with Pt Spacer Thickness in the Spin-Valve Co/Pt/[Co/Pt]₂Multilayers / F. Zhang, Z. Liu, F. Wen // Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. – 2017. – V. 30, No. 2. – P. 533–538.
24. Magnetization reversal signatures in the magnetoresistance of magnetic multilayers / P. Perna, C. Rodrigo, M. Muñoz et al. // Physical Review B – 2012. – V. 86. – P. 024421(6).
25. Шабельник Ю.М., Чешко І.В., Логвинов А.М., Ткач О.П., Проценко С.І., Патент на корисну модель «Функціональний металевий елемент гнучкої електроніки спін-клапанного типу» № 136613 (27.08.2019 р.).