

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

Кафедра електроніки загальної та прикладної фізики

Кваліфікаційна робота магістра
**ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ МАГНІТНОГО ПОЛЯ:
ТЕХНОЛОГІЧНІ І ФІЗИЧНІ ПАРАМЕТРИ**

Магістрант гр. ЕП.м-91н

Е. О. Сема

Науковий керівник

к. ф.-м. н, ст. викладач

Ю. М. Шабельник

Завідувач кафедри ЕЗПФ

д.ф.-м.н., професор

І. Ю. Проценко

Суми 2021

РЕФЕРАТ

Предметом дослідження є фізичні властивості мікроелектронних сенсорів магнітного поля: конструктивні та технологічні параметри.

Метою роботи є аналіз фізичних властивостей фізичні властивості мікроелектронних сенсорів магнітного поля їх дослідження конструктивних та технологічних параметрів, можливості їх застосування як елементів електронних сенсорів, визначивши їх переваги і недоліки.

Розглянуто електрофізичні властивості різних типів мікроелектронних сенсорів магнітного поля: конструктивні та технологічні параметри, а саме магніторезистори на основі магнітоконцентраційного ефекту, магніторезистори на ефекті гігантського магнітоопору, магнітодіоди, перетворювачі Холла, магнітотранзистори та плівки для візуалізації магнітного поля. Цей клас приладів знайшов широке технічне застосування в різних галузях промисловості та приладобудування, від медицини до автомобільної та космічної промисловості. Також установлені фактори, що впливають на механічні та електрофізичні властивості мікроелектронних сенсорів магнітного поля.

Робота викладена на 32 сторінках і складається з трьох розділів, містить 22 рисунки, 2 таблиці.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: МАГНІТОРЕЗИСТОРИ, ГІГАНТСЬКИЙ МАГНІТООПІР, МАГНІТОДІОДИ, ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ХОЛЛА, МАГНІТОРЕЗИСТОРИ, ТОНКІ ПЛІВКИ

ЗМІСТ

ВСТУП	3
РОЗДІЛ 1. ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ МАГНІТНОГО ПОЛЯ (ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД)	4
1.1. Основні параметри тонкоплівкових сенсорів.....	4
1.2. Гальваномагнітні сенсори параметрів магнітного поля.....	7
РОЗДІЛ 2. ЧУТЛИВІ ЕЛЕМЕНТИ ДАТЧИКІВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ	11
2.1. Фізичні та конструкційні параметри чутливих елементів датчиків Холла.....	11
2.2. Фізичні та конструкційні параметри чутливих елементів датчиків Віганда.....	13
2.3. Гальваномагніторекомбінаційні (ГМР) перетворювачі.....	15
РОЗДІЛ 3. ФУНКЦІОНАЛЬНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ СЕНСОРІВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ	16
ВИСНОВКИ	22
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	23

ВСТУП

На сьогоднішній день магнітні датчики набули поширення у різних сферах промисловості, оскільки їх використання для вимірювання струму, фіксації частоти обертання, створенні аналітичних приладів, контролю лінійних і кутових зміщень, гальванічної розв'язки, безконтактних вимикачів, виконання завдань дефектології та геологорозвідки, розпізнавання образів феромагнітних об'єктів, моніторингу позиції поршня в пневматичних та гідравлічних циліндрах тощо, забезпечує дотримання більшості сучасних вимог до чутливості, роздільної здатності та інших важливих параметрів вимірювальних систем.

Для заміру параметрів постійних, змінних та імпульсних магнітних полів створена велика кількість сенсорів. Найбільш часто використовуються датчики Холу, датчики Віганда, ферозонди, SQUID (на основі надпровідного квантового інтерферометра) сенсори, магнітоелектричні датчики, магнітотранзистори, магнітодіоди, магніторезистори, магнітооптичні системи, індукційні котушки, у тому числі системи з декількома індукційними котушками. Ці сенсори часто використовують як чутливі елементи для виміру характеристик магнітного поля та магнітних властивостей матеріалів, у металошукачах, для виміру електричних сигналів, у вимірювальній техніці. Залежно від величини, яку вимірюють ці пристрої, можливе їх застосування для виміру: магнітної індукції (тесламетри), напруженості магнітного поля (ерстедметри), магнітного потоку (веберметри або флюксометри), коерцитивної сили (коерцитиметри), магнітної проникності (мюметри), магнітної сприйнятливості (капаметри) та ін. Крім того, ці датчики застосовуються при пошуку корисних копалин, в археології, у навігаційних системах, на суші та у повітрі.

Результати роботи були представлені на Міжнародній науково-технічній конференції «Фізика. Електроніка. Електротехніка :: 2021» (ФЕЕ-2021) (м. Суми).

РОЗДІЛ 1

ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ МАГНІТНОГО ПОЛЯ

1.1. Основні параметри тонкоплівкових сенсорів.

Сенсор – такий конструктивно складний пристрій що слугує для вимірювання фізичних величин, який реагує безпосередньо на сигнал у зоні вимірювання. Завдяки сенсорам можна здійснити велику кількість різноманітних перетворень зокрема фізичних величин в електричний сигнал. Сенсорним пристроєм називається сукупність первинного та вторинного перетворювачів. Первинний перетворювач вмикається першим в коло пристрою, слугує для перетворення вхідного сигналу у вихідний який буде зручнішим для подальшої обробки. Вторинний слугує для обробки інформації з первинного, він подає інформацію в зручному для користувача вигляді [1]. Вихідними сигналами датчиків можуть бути напруга, струм або заряд, описувані такими характеристиками як амплітуда, частота, фаза або цифровим кодом. Набір характеристик, що описують сигнал, називається форматом вихідного сигналу. Кожен датчик характеризується набором вхідних параметрів (будь-якої фізичної природи) і набором вихідних параметрів.

Всі сенсори можна розділити на датчики прямої дії і складові. Датчики прямої дії перетворюють зовнішній вплив в електричний сигнал, використовуючи для цього відповідне фізичне явище (наприклад, фотоефект). У складених датчиках вихідний електричний сигнал отримують після проведення деяких перетворень енергії з одного виду в інший і нарешті в електричну. У складі вимірювальних систем датчики можуть бути зовнішніми і вбудованими. Зовнішні реагують на зовнішні впливи і повідомляють системі про зміни в навколишніх умовах. Вбудовані здійснюють контроль за функціонуванням вимірювальних систем, що необхідно для підтримки коректної роботи всіх внутрішніх пристроїв системи. Системи класифікації датчиків можуть бути найрізноманітнішими залежно від мети проведення класифікації.

Наприклад, одна з найбільш поширених – датчики можуть бути розділені на активні і пасивні. Активні датчики для забезпечення роботи мають потребу в електричному сигналі від зовнішнього джерела енергії (наприклад, резистивний тензодатчик, який змінює свій опір в залежності від величини деформації). Пасивні датчики не мають потреби в додатковому джерелі енергії і у відповідь на зовнішній вплив на виході такого датчика з'являється електричний сигнал [2]. Залежно від вибору точки відліку датчики можна розділити на абсолютні і відносні. Абсолютний датчик визначає зовнішній сигнал в абсолютних фізичних одиницях, що не залежать від умов вимірювань. Вихідний сигнал відносного датчика в кожному вимірі може трактуватися по-різному, в залежності від умов вимірювань. Наприклад, термістор є абсолютним датчиком, оскільки його електричний опір безпосередньо залежить від абсолютної температури, в той час як термопара є відносним датчиком, оскільки напруга на його виході залежить від градієнта температури, а не абсолютного її значення. класифікацію датчиків можна проводити і за іншими ознаками. Наприклад, за їх характеристиками, матеріалами, з яких вони виготовлені, за методом детектування, механізмом перетворення енергії впливу в електричний сигнал, видам зовнішніх впливів.

Найпростіший сенсор магнітного поля складається з магніточутливого елемента, який наноситься на підкладку, має виводи для з'єднання з електронною схемою посилення і обробки сигналу (рис. 1.1). магніточутливий елемент є частиною виробу, що здійснює функцію сприйняття контрольованих параметрів середовища або об'єкта і перетворює їх значення у власні електричні параметри [3].

Магніточутливі елементи виготовляються з матеріалів, що змінюють свої властивості під впливом зовнішнього магнітного поля. При створенні магніточутливих елементів використовуються різні фізичні явища, що відбуваються в напівпровідниках і металах при взаємодії їх з магнітним полем. Пристрої котрі працюють за допомогою ефекту Холла основані на так званому гальваномагнітному явищу [4]. Гальваномагнітними називаються явища фізичного

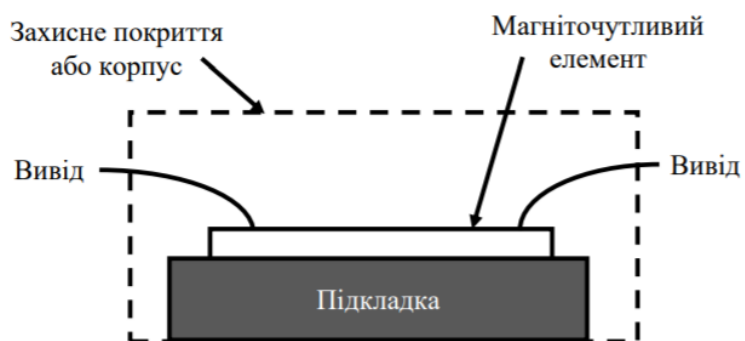


Рис. 1.1. – Конструкція найпростішого сенсора магнітного поля.
Адаптований із роботи [3]

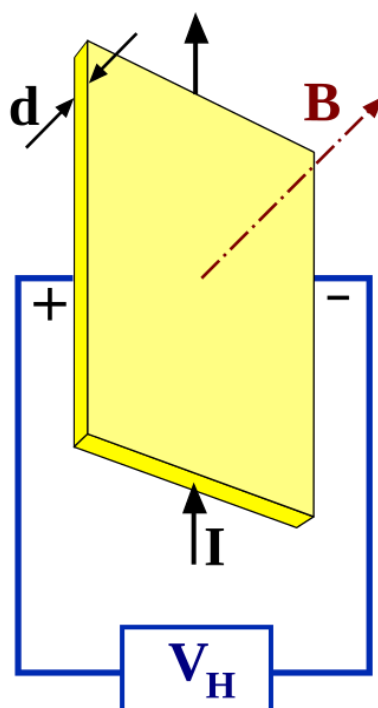


Рис. 1.2. – Схема демонстрації ефекту Холла. Адаптований із роботи [4]

походження котрі виникають під дією електричного струму в матеріалі при проходженні крізь нього магнітного поля. В сучасності найпоширенішими гальваномагнітними явищами є ефект Холла та магнітоопору. Ефект Холла (рис. 1.2) названий в честь американського фізика Едвіна Герберта Холла, який в 1879 р. працював над своєю докторською дисертацією та виявив що з'являється різниця потенціалів в плівці золота, поміщеному в сильне магнітне поле, перпендикулярне площині прямокутника, коли електричний струм подається по всій його довжині. Електрони що проходять крізь сильне магнітне поле піддаються дії сили Лоренца, тобто їхня реакція створює Холлівську напругу.

Нехай крізь металеву плівку котра знаходиться під дією магнітного поля B протікає електричний струм E . Магнітне поле буде відхиляти електрони проти або вздовж електричного поля спрямовуючи їх до країв плівки. Таким чином сила Лоренца призведе до накопичення позитивного і негативного зарядів на протилежних кінцях плівки відповідно. Заряд буде накопичуватись до тих пір, поки електричне поле зарядів E_1 , яке було створене магнітним полем, не врівноважить магнітну складову сили Лоренца: $E_1 = vB$. Швидкість електронів v визначається за допомогою густини струму: $J = nev$, звідси $v = j/ne$, де n – концентрація носіїв заряду. Тоді $E_1 = 1/ne \cdot jB$. Коефіцієнт пропорційності $R_H = 1/ne$ між E_1 та jB називають коефіцієнтом Холла. В цьому випадку від носіїв заряду залежить знак Холлівського коефіцієнта, це дозволяє визначити тип провідності для великої кількості матеріалів. Слід зауважити що під час вимірювання ефекту Холла необхідно враховувати сторонні е.р.с такі як) ефект Нернста та інші [5-7].

1.2. Гальваномагнітні сенсори параметрів магнітного поля

Розглянемо принцип дії деяких сучасних сенсорів магнітних полів. **Магніторезистивний датчик магнітного поля.** Принцип дії такого датчика (рис. 1.3) складається на зміні опору від прикладеного магнітного поля в деякому

ферромагнітному матеріалі. Зазвичай ці датчики виготовляються в малому корпусі сам сенсор має форму меандру, також до переваг відносять малу вартість приладу. Цей тип датчиків може реєструвати дуже малі зміни магнітного поля [8].

Анізотропний магніторезистивний датчик. Особливістю такого сенсора є гарна чутливість в зоні середніх частот, також виділяють стійкість характеристик

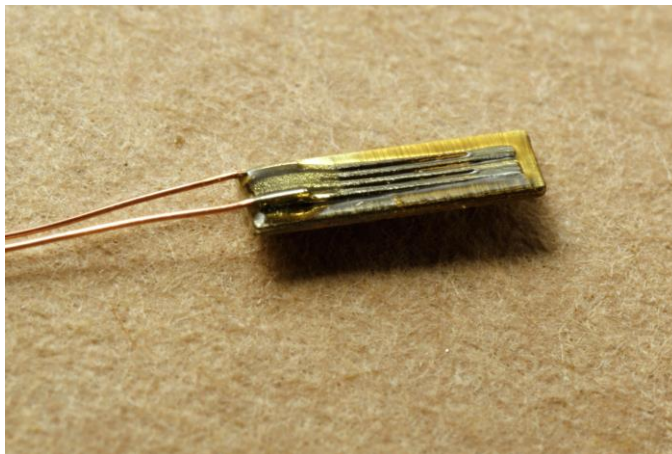


Рис. 1.3. – Зовнішній вигляд вітчизняного магніторезистора CM4-1. Із роботи [8]

до величини магнітного поля. До недоліків AMR датчиків відносять чутливість до неоднорідності постійного магнітного поля [9].

Датчик Віганда (рис. 1.4). Такий сенсор містить в собі спеціально оброблений дріт зі сплаву заліза ванадію та кобальту котрий намотаний в котушку з тисячі витків. Коли такий датчик потрапляє під дію магнітного поля, його магнітний поріг насиченості змінюється та різко перемикається на протилежний. Це в свою чергу спричиняє появи короткого імпульсу напруги в декілька вольт. Це перемикання і отримало назву ефект Віганда [10].

Датчик Холла. Найпоширенішим сенсором для вимірювання характеристик магнітних полів є датчик Холла. Конструктивно він виготовлений з однієї або декількох кристалів напівпровідника. Сенсори на основі ефекту Холла являються

активними, тобто вимірювальна напруга, що залежить від магнітного поля генерується самостійно. Датчики Холла набули популярності за для вимірювання переміщення та положення, в кожному смартфоні є цей сенсор. До переваг відносять гарну чутливість, компактність, можливість вимірювання постійних та змінних магнітних полів.



Рис. 1.4. – Приклад деяких датчиків Віганда. Із роботи [10]

Індукційні датчики. Цей сенсор дуже примітивний, створений з котушки індуктивності для вимірювання змінного магнітного поля. Працездатність сенсора забезпечується явищем електромагнітної індукції. Напруга генерована змінним магнітним полем на котушці залежить від індукції поля [11].

Гальваномагніторекомбінаційні (ГМР) перетворювачі. По суті це напівпровідниковий резистор який управляється за допомогою магнітного поля. Працездатність забезпечується завдяки магнітоконцентраційному явищу, яке полягає в зміні концентрації носіїв заряду під впливом поперечного чи повздовжнього магнітних полів. Головний недолік це висока складність виготовлення. До переваг відносять високу чутливість до магнітного поля [12-14].

Електростатичні датчики. Це ємнісний тип датчиків оснований на явищі періодичної її зміни. Електростатичні, ємнісні датчики мають малі витрати тепла, гарну чутливість та добротність [15]. Недоліком є складність монтування, необхідно мати добре захищений корпус та виключити можливість впливу шкідливих шумів.

Таблиця 1 – Порівняння характеристик наведених сенсорів магнітного поля [16]

Тип перетворювача магнітного поля	Розмір активної частини, мм ²	Магнітна чутливість, В/Тл	Діапазон вимірної індукції, мТл	Діапазон робочих частот, Гц	Динамічний діапазон, мТл	Споживана потужність, мВт
Магніторезистивний	0,3–100	1–60	10^{-4} – 10^2	0– 10^9	300–1000	30–90
Датчик Холла	0.02–50	0,02–5	10^{-4} – 10^3	0– 10^7	1000	10–50
Ферозонд	1–100	10	10^{-7} –10	0– 10^4	0,1–1	5–50
Магнітоелектричний	25–50	25	–	0– 10^9	1000–2000	1–5
ГМР	0,5–2	6–60	–	–	0–80	–
Магнітоіндуктивний	10×8×4	1–10	10^{-3} – 10^3	0– 10^6	1–200	–

Коректна оцінка результатів, не можлива через ряд об'єктивних критеріїв. Це пов'язано з високою складністю систем наведених раніше типів датчиків, різними їх конструкціями, різною геометрією та розмірами чутливих елементів, різними системами обробки отриманих сигналів.

РОЗДІЛ 2

ЧУТЛИВІ ЕЛЕМЕНТИ ДАТЧИКІВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ

2.1. Фізичні та конструкційні параметри чутливих елементів датчиків

Холла

Датчик Холла – це дуже поширений, дешевий в виробництві датчик, часто його можна зустріти в корпусі ТО-92, рис 2.1. (а), принцип його дії зображено на рис 2.1 (б). Працездатність датчика основана на ефекті виявленім Едвіном Х. Холлом, що було описане раніше. Ці датчики легкі і займають близько 0,65 см², їх споживана потужність становить від 0,1 до 0,2 Вт [12].

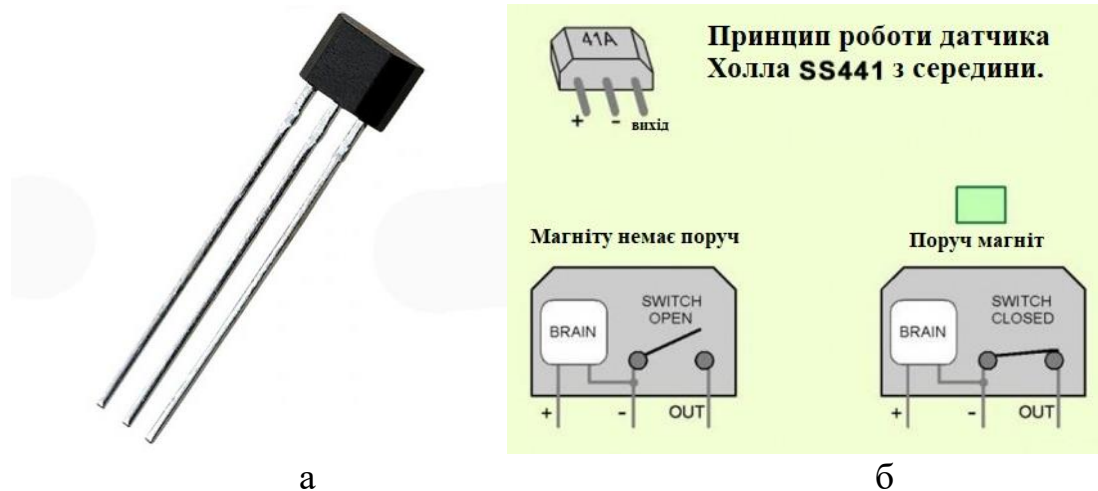


Рис. 2.1. – Датчик Холла в корпусі ТО-92 (а). Принцип роботи датчика Холла (б)

Холлівський ефект був відкритий в металевій плівці, однак використання напівпровідників значно покращує характеристики датчиків. Більшість датчиків Холла виготовляють з пластини кремнію, по чотирьох сторонах якої знаходяться контакти. Оскільки кремній володіє тензорезистивними властивостями, датчики, реалізовані на його основі, реагують на механічні деформації, тому необхідно мінімізувати навантаження на корпус датчика та контактні виводи. Крім того, датчики Холла є чутливими до температури - її коливання призводять до зміни

опору чутливих елементів. Якщо останній підключений до джерела напруги, зміни опору будуть впливати на значення опору, а, отже, і на струм в ланцюзі управління, тому краще керуючі виводи підключати до джерела струму, а не напруги.

Більш чутливі датчики можуть бути виготовлені з напівпровідників з III-V з'єднанням, які мають більш високу рухливість електронів, ніж кремній. Більшість комерційних датчиків Холла мають чутливі елементи з антимоніда індію (InSb) III-V напівпровідників. Кремнієві пристрої мають діапазон чутливості в межах від 10^6 до 10^8 нТл, а індій-антимонідні датчики розширюють нижню межу до 10^8 нТл. Ці датчики бувають прості і інтегровані на одній підкладці з інтерфейсними електронними схемами. Така особливість важлива при побудові прецизійних датчиків, оскільки напруга Холла зазвичай досить мала за величиною. Вбудована інтерфейсна схема може мати в своєму складі пороговий детектор, що перетворює датчик в пристрій з двома положеннями - вихідний сигнал дорівнює нулю при величині магнітного поля нижче порогового значення, і одиниці, коли перевищує порогове значення.

Польовий МОН-елемент Холла, структуру якого зображено на рис 2.2 генерує носії заряду завдяки поверхневого ефекту поля, на відміну від звичайного, де носії забезпечуються самим матеріалом [17].

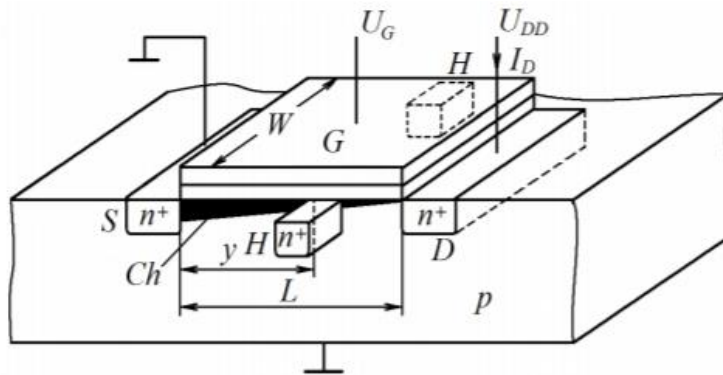


Рис. 2.2. –Принципова структура польового МОН-елемента Холла. Адаптовано із роботи [17]

Напруга Холла в польовому елементі значно залежить від місця розташування холлівських контактів. Це пояснюється тим, що поле Холла при зменшенні концентрації носіїв заряду збільшується. Значним недоліком польового елемента Холла є вплив поверхневої рекомбінації на напругу Холла. Перетворювачі на основі ефекту Холла використовуються для вимірювання параметрів постійних, змінних та імпульсних магнітних полів; верхня межа частоти складає близько 1 МГц, також для визначення характеристик феромагнітних матеріалів.

2.2 Фізичні та конструкційні параметри чутливих елементів датчиків Віганда

Робота датчика основана на ефекті відкритому в 1975р американським дослідником Джоном Річардом Вігандом. Вчений досліджував вплив електромагнітних полів на різні типи провідників, він виявив чіткий фізичний ефект, який проявляється в тому, що коли феромагнітний дріт, котрий має спеціальний хімічний склад та фізичну структуру помістити в магнітне поле відбудеться спонтанна зміна його поляризації, коли напруженість поля перевищить визначений поріг спрацювання.

Це явище спостерігається при виконанні двох умов. Перша - дріт повинен мати спеціальний хімічний склад з попередньо механічно обробленого дроту із сплаву «Вікалой» (10% V, 52% Co, 38% Fe) і двошарову структуру рис 2.3. Друга - напруженість магнітного поля повинна бути вище певного порогового значення - поріг запалювання. Момент зміни поляризації дроту можна спостерігати за допомогою котушки індуктивності, розташованої поруч з дротом. Зміна поляризації супроводжується появою короткого імпульсу напруги тривалістю ≈ 20 мкс і амплітудою $\approx 2,5$ В. При цьому коли магнітне поле направлено відносно

датчика в один бік імпульс напруги буде додатнім, якщо поле направлено в інший бік- від'ємним.

На сьогоднішній день ефект пояснюється різною швидкістю переорієнтації елементарних магнітів в магнітом'якій серцевині і магнітотвердй оболонці проволочки. Отримувати такі структури вдається за рахунок використання спеціальної технології виготовлення. Діаметр дроту 0,2-0,3 мм, довжина - 5 - 40 мм. Обмотка датчика зазвичай становить 1000-2000 витків мідного дроту діаметром 0,05-0,1 мм та довжиною 15мм [10].

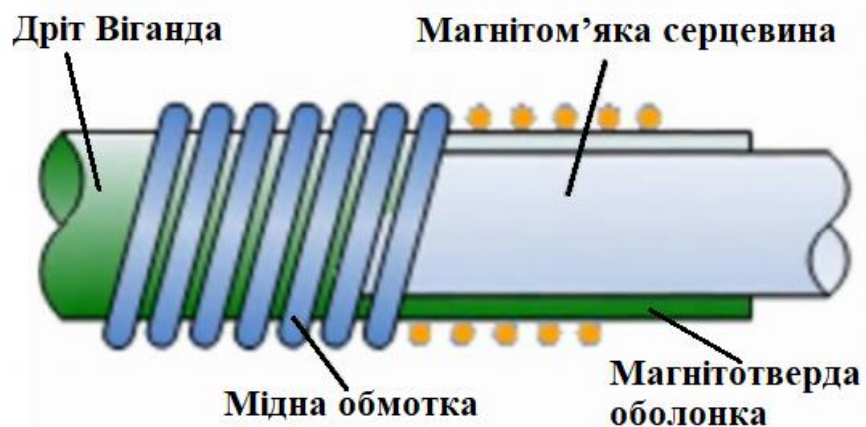


Рис. 2.3. – Будова чутливого елемента Віганда. Адаптовано із роботи [10]

Конструкція датчиків Віганда містить котушку індуктивності і дріт Віганда. При зміні поляризації дроту, котушка, намотана на неї, фіксує цю зміну. До переваг датчика Віганда слід віднести стійкість до впливу зовнішніх електричних і магнітних полів, широкий температурний діапазон роботи ($-200^{\circ} \dots + 200^{\circ}\text{C}$), роботу без джерела живлення, конструктивну захищеність від коротких замикань, іскробезпеку. На основі ефекту Віганда створили датчики нульового енергоспоживання WG (також звані Wiegand Sensor), вони є свого роду магнітним компонентом нового типу. Такі датчики можуть самостійно генерувати енергію, їм не потрібне живлення зовні, коли вони працюють.

2.3. Гальваномагніторекombaційні (ГМР) перетворювачі

Перетворювачі Гальваномагніторекombaційного (ГМР) основані на ефекті зміни середньої концентрації носіїв заряду при наявності магнітного поля, в провідниках, поверхні яких мають різну швидкість рекомбації носіїв заряду. Будова датчика показана на рис 2.4. напівпровідникова пластина має зі сторони 1 матову структуру, зі сторони 2 вона добре відполірована. Внаслідок цього біля поверхні 1 швидкість рекомбації носіїв зарядів на 2-3 порядки більша, ніж біля поверхні 2. Коли датчик розташований в магнітному полі так, що вектор магнітної індукції направлений перпендикулярно вектору густини струму і паралельно площинам, то під дією сили Лоренца відбувається відхилення носіїв заряду до однієї з бічних поверхонь, змінюється опір ГМР перетворювача [18].

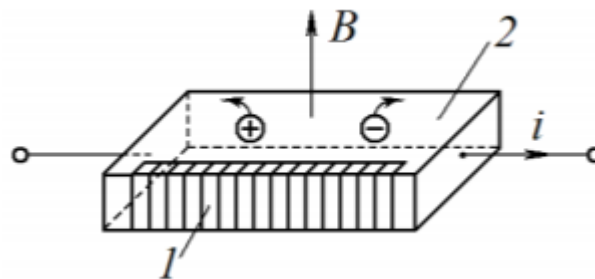


Рис. 2.4. – Гальваномагніторекombaційний перетворювач

Основними недоліками цього типу приладів є вплив температури, шумів та контактів, складність виготовлення. ГМР перетворювачі використовуються для вимірювання індукції постійних та змінних магнітних полів, безконтактного вимірювання струму, малих переміщень тощо.

РОЗДІЛ 3

ФУНКЦІОНАЛЬНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ СЕНСОРІВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ

Магнітопружні датчики завдяки гарній чутливості та простій і водночас надійній конструкції здобули велику популярність. В магнітопружних датчиках принцип дії закладається на основі магнітопружного ефекту, котрий в 1865 році був відкритий італійським вчений Еміліо Віларі. Магнітопружним ефектом називають зміну індукції або магнітної проникності у феромагнітних тілах при дії на них зовнішньої сили.

Феромагнетики- це речовини елементарні структури яких мають власні магнітні моменти, спонтанно орієнтовані паралельно один до одного або складнішим чином, внаслідок цього утворюються так звані домени з відмінним від нуля сумарним магнітним моментом. Такі властивості характерні залізу, кобальту, нікелю та їх сплавам, з цих речовин в основному виготовляють постійні магніти.

Причина виникнення магнітопружного ефекту закладається в наступному. Феромагнітні речовини мають зони намагнічення, тобто домени, котрі довільним чином розташовані у матеріалі. В деяких доменах магнітні моменти будуть компенсувати один одного, із-за цього сумарна напруженість магнітного поля буде рівнятись нулю, що показано на рис. 3.1 [19].

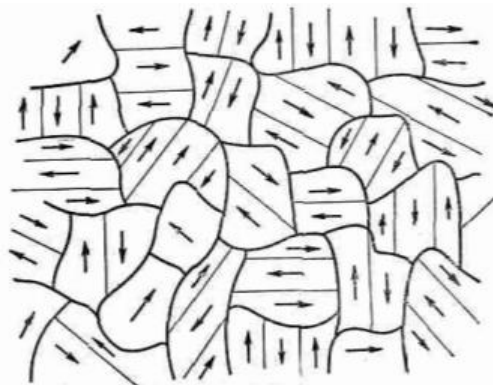


Рис.3.1. Взаємна орієнтація магнітних доменів. Із роботи [19]

Після переміщення феромагнетика до зовнішнього магнітного поля його домени будуть зорієнтовані повздовж ліній індукції цього поля. В залежності від сили магнітного поля орієнтація доменів буде змінюватися, в сильному полі при насиченні матеріалу всі домени зорієнтуються, це в свою чергу призведе до збільшення магнітної індукції.

Під дією механічного впливу прикладеного до намагніченого феромагнітного матеріалу відбувається його деформація, змінюється взаємна орієнтація доменів, що призводить до переміни величини магнітної індукції тіла. Цей процес є пружним, це означає, що індукція повернеться до початкового значення при знятті механічної сили.

При сталій напруженості магнітного поля H зміна індукції B буде пропорційною магнітній прониктості феромагнетика, бо

$$B = \mu_0 \mu_B H$$

μ_0, μ_B -магнітна постійна вакууму, та матеріалу відповідно.

На рисунку 3.2. показано приклад гістерезисних кривих нікелю для відмінних механічних напруг розтягу.

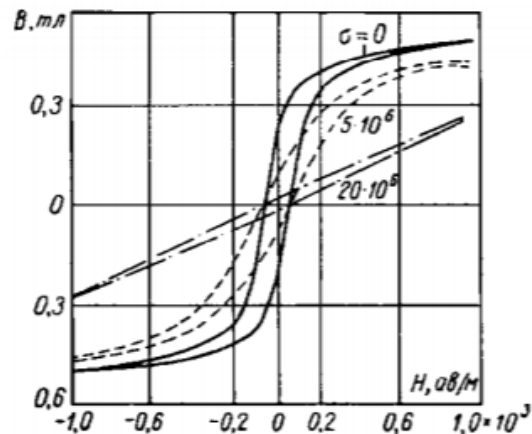


Рис.3.2. Гістерезисні криві нікелю. Із роботи [20]

Проаналізувавши графік, стає зрозуміло, якщо збільшувати прикладене механічне напруження на датчик, то нахил петлі гістерезису буде змінюватися в

більшу сторону. Це означає, що при умові однакової величини напруженості зовнішнього поля H , зростання механічного навантаження спричиняє зменшення магнітної індукції B , а також магнітної проникності феромагнетика.

Варто звернути увагу, що магнітна проникність для пермалою, навпаки різко зростатиме. Головною якістю матеріалу з точки зору його магнітопружних властивостей є коефіцієнт магнітопружної чутливості k_μ , котрий характеризується як відношення відносної зміни магнітної проникності $\Delta\mu/\mu$ до відносної зміни деформації $\Delta l/l$.

$$k_\mu = \frac{(\mu_{\Pi} - \mu_{\sigma})/\mu_{\Pi}}{\Delta l/l},$$

де μ_{Π} - магнітна проникність до навантаження, μ_{σ} - магнітна проникність при навантаженні.

В сучасність існує велике різноманіття конструкцій магнітних датчиків, котрі дистанційно слугують детекторами регулювання та контролю виробничих процесів.

Переваги магнітопружних датчиків проявляють в їх надійності при використанні в важких умовах експлуатації.

При огляді [12-20] на ймовірність масового використання магнітопружних датчиків в промислових сферах, все частіше виникає питання про їх конструкційну складову. На основі цих даних, перевагу отримують датчики, в яких чутливий елемент виконаний з суцільного матеріалу та має форму циліндра, його котушки знаходяться за межею чутливого елемента.

Чутливий елемент та зовнішній механічний перетворювач магнітопружного датчика являють собою частини котрі виконують механічні перетворення. Параметр вимірювання залежить від впливу на зовнішній механічний перетворювач, та може змінюватись за знаком, величиною, типом.

Порівнявши різні конструкційні особливості популярних магнітопружних датчиків можна поділити їх на три основні групи:

- Трансформаторні магнітопружні перетворювачі.
- Індуктивні магнітопружні перетворювачі.
- Анізотропні магнітопружні перетворювачі.

Магнітопружні перетворювачі з однією котушкою називають індуктивними. На рис 3.4. а,б) зображено схема індуктивного перетворювача з однією котушкою на робочому стержні магнітопроводу. На рис 3.4 в) зображено зовнішній вигляд такого перетворювача.

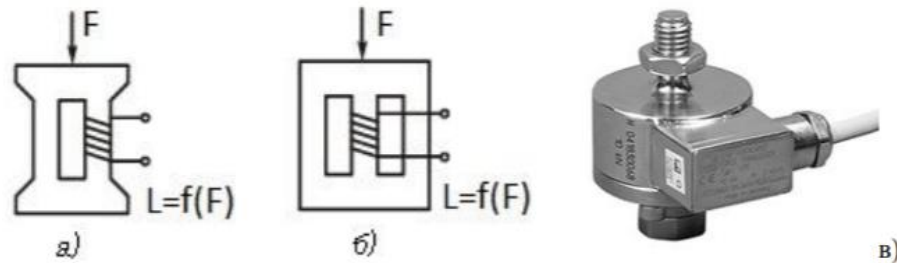


Рис.3.3. Конструкція магнітопружного перетворювача(а,б) та зовнішній вигляд такого пристрою (в). Із роботи [21]

В цьому випадку послідовність перетворення вхідного сигналу від сили F буде наступною:

$$F \rightarrow \sigma = \frac{F}{S} \rightarrow \mu \rightarrow R_n \rightarrow \Delta L \rightarrow \Delta Z ,$$

тобто це означає, що сила F перетворюється в напруження магнітопроводу, яке поступово спричиняє зміну магнітної проникності, магнітного опору, індуктивності котушки а також індуктивного опору.

Знайдемо аналітичну залежність зміни індуктивності ΔL від величини прикладеної сили F .

Індуктивність котушки:

$$L = \frac{\Psi}{I} = \frac{w\phi}{I} = \frac{w}{I} \cdot \frac{F_M}{R_M} = \frac{wwI}{IR_M} = \frac{w^2}{R_M},$$

де Ψ - магнітне потокозчеплення витків котушки; w - кількість витків котушки; I - струм; ϕ - магнітний потік; R_M - опір магнітопроводу; F_M - магніторушійна сила.

Врахувавши, що магнітний опір $R = \frac{l}{\mu S}$, де l - напрямлення силової магнітної лінії по центру магнітопроводу; μ - магнітна проникність матеріалу з якого вготовлений магнітопровід; S - площа перерізу магнітопроводу, маємо $L = \frac{w^2 \mu S}{l}$.

Підрахуємо як буде змінюватись індукція ΔL , під дією на магнітне поле стискуючих або розтягуючих сил.

$$\begin{aligned} \Delta L \approx dL &= \frac{\partial L}{\partial \mu} d\mu + \frac{\partial L}{\partial S} dS + \frac{\partial L}{\partial l} dl = \frac{w^2 S}{l} d\mu + \frac{w^2 \mu}{l} dS - \frac{w^2 \mu S}{l^2} dl \\ &= L \frac{d\mu}{\mu} + L \frac{dS}{S} - L \frac{dl}{l} = L \left(\frac{d\mu}{\mu} + \frac{dS}{S} - \frac{dl}{l} \right) \end{aligned}$$

Візьмемо до уваги коефіцієнти магнітопружної чутливості k_μ та Пуассона k_Π .

$$k_\mu = \frac{\Delta \mu / \mu}{\Delta l / l}, \quad k_\Pi = - \frac{\Delta S / S}{\Delta l / l}$$

Розділимо формулу для індукції ΔL ліворуч та праворуч на $\frac{\Delta l}{l}$ та підставимо вирази для k_μ та k_Π , вираз прийме наступний вигляд:

$$\Delta L = L \frac{\Delta l}{l} (k_\mu - k_\Pi - 1)$$

За для отримання більш повної функції перетворення ($\Delta L = f(F)$) треба провести розрахунки, дотримуючись правил механіки, значення механічних напружень σ магнітопроводу та їх залежність від вимірюваної сили F . За умови що механічні напруження σ під впливом сили F прийняти як для суцільного циліндра, тоді: $\sigma = E \frac{\Delta l}{l} = \frac{F}{S}$, де E - модуль Юнга матеріалу.

Беручи до уваги останню формулу одержимо фінальний вираз функції перетворення індуктивного магнітопружного перетворювача.

$$\Delta Z = \omega \Delta L = \omega L \frac{F}{SE} (k_\mu - k_\Pi - 1)$$

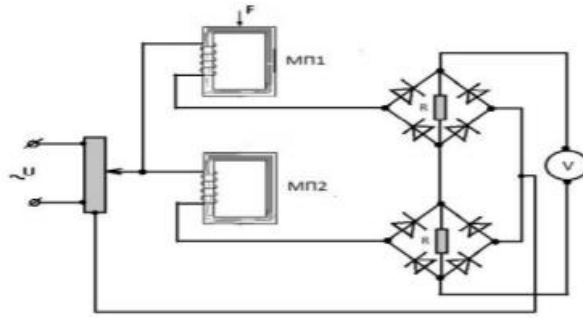


Рис 3.4. Схема увімкнення перетворювача в мостове коло.

Зазвичай магнітопружні перетворювачі виготовляють диференціальними і використовують вмикаючи в мостове вимірювальне коло рис 3.4. Магнітопружний елемент МП1 виступає в ролі перетворювача сили F , на аналогічний елемент МП2 не впливають ніякі сили, він служить для компенсації початкової індуктивності. Додатково МП2 слугує задля компенсації впливу зовнішніх факторів, наприклад температури, частоти джерела живлення.

До трансформаторного типу перетворювачів відносять ті що мають дві обмотки на стержнях магнітопроводу, також їх називають взаємоіндуктивними. рис 3.3.

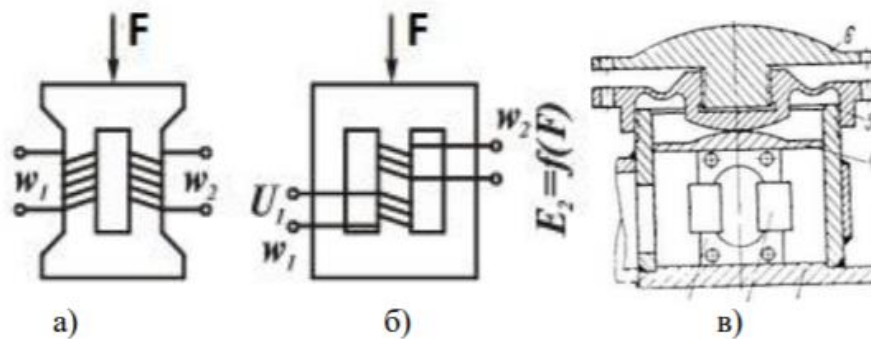


Рис. 3.5. – Конструкція трансформаторного магнітопружного перетворювача [22]

Магнітна проникність магнітопроводу μ залежить від прикладеної сили F , це змінює взаємну індукцію котушок M . Цей процес має наступну послідовність:

$$F \rightarrow \sigma \rightarrow \mu \rightarrow R_M \rightarrow M \rightarrow \varepsilon$$

Отримаємо функцію перетворення для цього типу перетворювача. Змінний

струм I_1 першої котушки генерує перемінне магнітне поле Φ_M , що перетинає витки другої котушки. Для знаходження ЕРС в іншій обмотці використовують вираз:

$$\varepsilon = \omega I_1 M_{12}$$

Оскільки коефіцієнт взаємоіндукції котушок:

$$M_{12} = \frac{\psi}{I_1} = \frac{w_2 \Phi_{12}}{I_1} = \frac{w_2}{I_1} \cdot \frac{F_M}{B_M} = \frac{w_2}{I_1} \cdot \frac{w_1 I_1}{\frac{l}{\mu S}} = \frac{w_1 w_2 \mu S}{l}$$

Тоді з цього отримаємо:

$$\varepsilon = \omega w_1 w_2 I_1 \mu S \frac{1}{l}$$

Ця ЕРС утворюється за відсутності вимірюваної сили ($F=0$).

Вичислимо приріст ЕРС при наявності вимірюваної сили, для цього необхідно визначити диференціал функції.

$$\Delta \varepsilon \approx d\varepsilon = \frac{\partial \varepsilon}{\partial \mu} d\mu + \frac{\partial \varepsilon}{\partial S} dS + \frac{\partial \varepsilon}{\partial l} dl = \varepsilon \left(\frac{d\mu}{\mu} + \frac{dS}{S} - \frac{dl}{l} \right)$$

Відносна зміна вихідного сигналу:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} = \frac{d\mu}{\mu} + \frac{dS}{S} - \frac{dl}{l}$$

Розділимо цей вираз на величину $\frac{\Delta l}{l}$ праворуч та ліворуч. Врахувавши вирази для коефіцієнта магнітопружної чутливості та коефіцієнта Пуассона отримаємо :

$$\Delta \varepsilon = \varepsilon \frac{\Delta l}{l} (k_\mu - k_\Pi - 1)$$

В цій формулі невідомо як саме відносна деформація $\frac{\Delta l}{l}$ залежить від сили F .

Якщо допустити, що ця залежність буде такою ж як і для суцільного циліндра, тобто:

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{F}{SE},$$

тоді фінальний варіант функції перетворення буде мати наступний вигляд:

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon \frac{F}{SE} (k_{\mu} - k_{\Pi} - 1).$$

Магнітоанізотропний перетворювач виготовляють з трансформаторної сталі, по периметру симетрично розміщені чотири отвори. Через дані пари отворів намотано дві обмотки, перпендикулярно одна до одній, вони утворюють кут 45° до напрямку прикладеної сили F рис 3.6. Принцип роботи заключаєть в наступному: при відсутності вимірюваного зусилля на датчик, лінії магнітного потоку намагнічуваної обмотки будуть розміщені симетрично, завдяки ізотропним властивостям феромагнетика, і не взаємодіятимуть з вимірювальною обмоткою. Після прикладення вимірюваного зусилля F на датчик магнітна проникність речовини буде різною. Магнітні лінії витягнуться у напрямку більшої магнітної проникності і стиснуться у напрямку меншої проникності. В результаті магнітні лінії зчіплюються з вимірювальною обмоткою, це призведе до виникнення в ній електрорушійної сили.

До магнітопружних датчиків, які використовують зміну магнітних властивостей речовини датчика в якомусь з перпендикулярних напрямків відносять наступні типи датчиків [23]:

- дросельного;
- мостового;
- електричного опору;
- диференційно-трансформаторного;
- шунтового типів.

До магнітопружних датчиків що застосовують зміну ступеня магнітної анізотропії матеріалу чутливого елемента відносять:

- селсиний датчик трансформаторного типу;
- магнітоанізотропні.

При виборі типу та конструктивної схеми МД встановлюють вимоги, яким він повинен відповідати:

1. Велика потужність вихідного сигналу.

2. Вимірювання механічного зусилля, котрі з'являються у рухомих механізмах.

3. Технологія виготовлення, а також мала похибка вихідних параметрів при багатосерійному виробництві МД. Такі вимоги в більшості випадків задовольняє МД з циліндричним чутливим датчиком.

4. Лінійність перетворення. Магнітопружне перетворення має нелінійний характер, більш правильно буде використати таку схему МД, яка забезпечить можливість лінеаризації вихідних даних. Непогані показники отримують безконтактні МД трансформаторного та диференційно-трансформаторного типу.

Такі вимірювальні системи бувають двох типів, перший- це нульбалансні системи, котрі показують високу чутливість від початку вимірювання, другий- це схеми з вторинними приладами безпосередньої оцінки.

Є два зусилля магнітопружних датчиків промислового призначення стискаюче і розтягуюче.

Найбільшу популярність одержали МД стискаючих та розтягуючих зусиль з багатосекційними чутливими елементами кільцевої та призматичної форми.

При застосуванні ефекту Хола, вимогам високої експлуатаційної надійності відповідають трансформаторні і магнітоанізотропні магнітопружні перетворювачі (МПП). Вони знайшли застосування в судових автоматичних системах управління для контролю і виміру: крутного моменту, механічної напруги, вантажних і тягових зусиль.

У МПП застосовується магнітопружний ефект, який проявляється в тій чи іншій мірі у всіх феромагнітних матеріалів і полягає в зміні магнітних властивостей феромагнітних матеріалів під дією пружних механічних напруг. Спільне використання трансформаторного МПП і магнітоанізотропного перетворювача (МАП) з датчиком Хола дозволило розробити багатофункціональні датчики механічних величин.

Удосконалення магнітопружного перетворювача на сьогодні йде в основному шляхом пошуку матеріалів, що поєднують високу тензочутливість, стабільність коефіцієнта перетворення і велику механічну міцність. Принципи дії пристроїв і основні характеристики МПП, отримані на основі досліджень електромагнітних процесів.

Ефект Хола – непарний гальваномагнітних ефект (пропорційний першого ступеня напруженості магнітного поля);

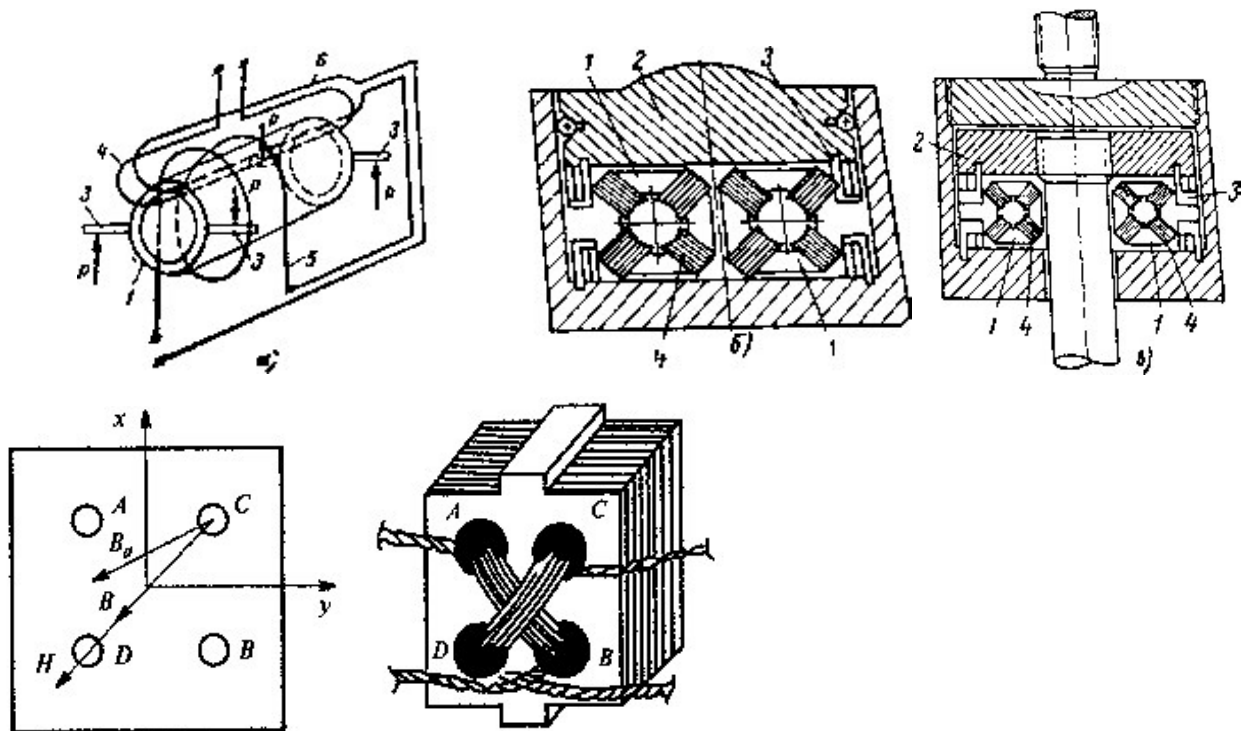


Рис. 3.6 – Магнітоанізотропний перетворювач та його принцип дії [10]

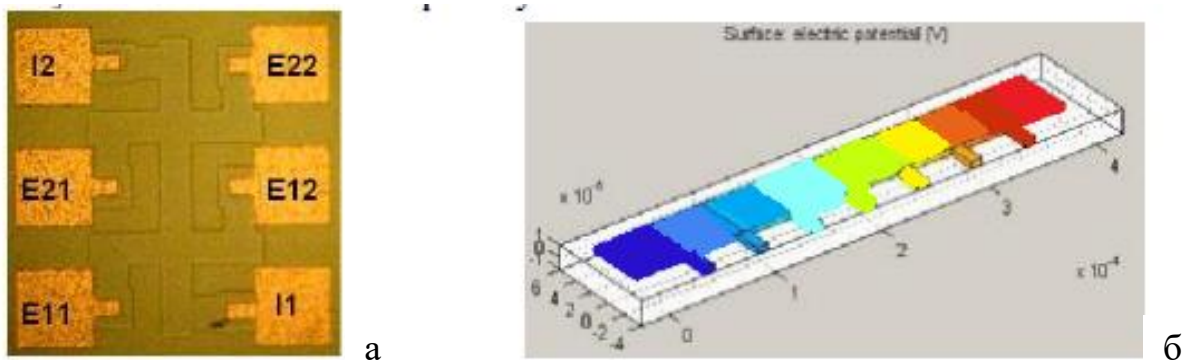


Рис. 3.7 – Структура (а) та модель (б) сенсора магнітного поля [12]

Застосування датчиків Хола в значній мірі зменшує вплив потоків розсіювання, створюваних обмоткою збудження, на вихідний сигнал трансформаторного магнітопружного перетворювача.

Магнітоанізотропні перетворювачі відрізняються високою стабільністю і невеликою похибкою.

На рис. 3.6 наведена конструкція магнітоанізотропного перетворювача, згаданого раніше. Магнітопровід перетворювача представляє пакет, набраний із пластин трансформаторного заліза. перпендикулярно, і до обмотки збудження подається живлення від джерела змінного струму. З вимірювальної обмотки знімається вихідний сигнал [10].

Для матеріалів з позитивною магнітострикцією магнітна проникність вздовж осі x зменшується, в той час як уздовж осі y вона залишається незмінною. Таким чином, під дією механічного зусилля матеріал МПП стає анізотропним.

Утворення анізотропії матеріалу магнітопроводу призводить до спотворення магнітних силових ліній, які з кіл переходять в еліпси.

Гальваномагнітні сенсори є одним з найбільш популярних засобів вимірювання магнітного поля. Їхньою характеристикою є здатність вимірювати в широкому діапазоні магнітного поля (від одиниць мікроТесла і до десятків Тесла) та температури (від одиниць градусів Кельвіна і до 400 К), мініатюрні розміри (декілька міліметрів), висока технологічність та мала собівартість у масовому виробництві. В даній роботі представлені основні підходи в структурній побудові моделювання та застосування гальваномагнітних сенсорів в біомедичній апаратурі. На рис. 3.7, а наведено типові структури виготовлених нами мініатюрних магнітометричних холлівських сенсорів, які формуються за новітніми технологіями кремнієвих інтегральних схем [12]. При проектування сенсорних пристроїв магнітного поля для біомедичної апаратури потрібно вирішити такі проблеми, як біологічна сумісність, мініатюрність, можливість живлення від мініатюрних автономних джерел живлення. З цією метою створили

спеціальні захисні оболонки магнітометричних зондів, оптимізували структурні та схемні рішення сенсорних пристроїв. Зокрема, значна увага приділяється оптимізації структури сенсора з точки зору вимог до його функціональності та функції перетворення. Оптимізація конструктивних рішень проводиться шляхом комплексного застосування пакетів FEMLAB та MATLAB. В першому з них проводиться структурне, а в другому – параметричне моделювання.

ВИСНОВКИ

1. Розвиток сенсорики стимулює пошук нових багатошарових систем з заданими параметрами стійкими до впливу різних зовнішніх факторів.

2. Найпоширенішими системами, які використовуються як робочі елементи плівкових сенсорів, виступають мультишари Co/Cu, Fe/Cr. Аналіз літературних даних свідчить про те, що у порівнянні з мультишарами чи гранульованими сплавами, плівкові матеріали із спін-залежним розсіюванням електронів у вигляді багатошарових плівок та спін-класанних структур значно простіші з точки зору виготовлення, а також мають великий потенціал застосувань при виготовленні різноманітних приладових структур. Особливо цікавим з точки зору магнітних, магнітооптичних та магніторезистивних властивостей є порівняння між собою систем із різним ступенем розчинності компонент.

3. При створенні, на основі багатошарових плівкових систем, чутливих елементів датчиків магнітного поля дуже важливим є питання стабільності інтерфейсів у системі під дією температури та часу. Згідно літературних даних дифузійні процеси можуть викликати розмиття інтерфейсу та утворення проміжних фаз по всьому об'єму плівки, і як результат зміну електрофізичних властивостей плівкових зразків. Аналіз вказує на необхідність встановлення кореляції між структурно-фазовим станом багатошарових плівкових систем та магнітними, магнітооптичним та магнітотранспортними властивостями під дією температури.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. М.П. Орлова, О.Ф. Погорелова, С.А. Улыбин. Низкотемпературная термометрия. Энергоатомиздат, Москва, 280 с. (1987).
2. Шматько. А.А. Электронные приборы сверхвысоких частот / А.А. Шматько // Харьков: ХНУ им. В.Н. Каразина, 2006. – 328 с.
3. Проценко І.Ю. Технологія одержання і застосування плівкових матеріалів / І.Ю. Проценко, Н.І. Шумакова // Суми: Вид-во СумДУ, 2007. – 198 с
4. Мокров Е.А. Применение элементов систематологии для минимизации влияния дестабилизирующих факторов на тонкопленочные тензорезистивные датчики давления / Е.А. Мокров, В.А. Васильев, Е.М. Белозубов // Датчики и системы. – 2005. – №3. – С. 10 – 12.
5. Djamal Mitra Development of sensors based on giant magnetoresistance material / Mitra Djamal, Ramli// Proc. Eng. – 2012. – Vol. 32. – P. 60 – 68.
6. Ni₈₀Fe₂₀/Au/Co/Au multilayers as magnetic field sensors / Stobiecki F., Urbaniak M., Szymanski B. [et. al.] // Materials Science-Poland – 2006. – Vol. 24, No3. – P. 833 – 838.
7. Norris A. Temperature and moisture monitoring in concrete structures using embedded nanotechnology/microelectromechanical systems (MEMS) sensors / Norris A., Saafi M., Romine P. // Construct. Build Mat. – 2008. – Vol. 22. – P. 111 – 120.
8. Тензорезистивні ефекти в аморфних металевих сплавах / М.П. Семенько, М.І. Захаренко., Ю.А. Куницький [та ін.] // Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАНУ, Київ. нац. ун-т ім. Т. Шевченка. – К. – 2009. – 74 с.
9. P.R.N. Childs, J.R. Greenwood, C.A. Long. Review of temperature measurement // Rev. Sci. Instrum. – 2000. – Vol. 71. – P. 2959–2978.

10. Conductance and giant magnetoresistance of Co/Cu/Co spin valves: Experiment and theory / W.H. Butler, X.G. Zhang, T.C. Schuitness [et al.] // *Phys. Rev. B.* – 1997. – Vol. 56, № 22. – P. 14574 – 14582.
11. Zhang H. Microfabrication and test of a magnetic field sensor using electrodeposited thin film of giant magnetoresistive (Cu/Co)_x multilayers / Zhang H., Wang W. // *Microsystem Technologies* – 2003. – Vol. 9, No6-7. – P.436 – 440.
12. Theoretical evaluation of magnetotransport properties in Co/Cu/Co-based spin valves / C. Blaas, L. Szunyogh, P. Weinberger [et al.] // *Phys. Rev. B.* – 2002. – Vol. 65. – P.134427-1 – 134427-8.
13. Oscillatory interlayer coupling and giant magnetoresistance in Co/Cu multilayers // D.H. Mosca, F. Petroff, A. Fert [et al.] // *J. Mag. Magn. Mater.* – 1991.
14. Giant magnetoresistance in magnetic nanostructures / A. Barheleny, V. Gros, J.L. Duvail [et al.] // *Nanostruct. Mat.* – 1995. – Vol. 6. – P.217 – 226.
15. Parkin S.S.P. Giant magnetoresistance in magnetic nanostructures / S.S.P. Parkin, // *Annu. Rev. Mater. Sci.* – 1995. – Vol. 25. – P.357 – 388.
16. Hirota E. Giant Magneto-Resistance Devices / E. Hirota, H. Sakakima, K. Inomata // N.Y.: Springer. – 2002. – Vol. 40. – P. 240.
17. Du J.H. Microstructural characterisation of CoAg granular films/ J.H. Du, W.J. Liu, Q. Li [et al.] // *J. Magn. Magn. Mater.* – 1999. – Vol. 191. – P.17 – 24.
18. Бараш Л. Спинэлектроника – электроника следующего поколения / Бараш Л. // *Компьютерное обозрение.* – 2002. – №39. – С.61 – 63.
19. Третьяк О.В. Фізичні основи спінової електроніки / Третьяк О.В., Львов В.А., Барабанов О.В. // – Київ: КНУ, 2002. – 314 с.
20. Магніторезистивні властивості спін-вентильних структур на основі Co та Cu або Au / М. Г. Демиденко, С. І. Проценко, Д. М. Костюк [та ін.] // *Ж. наноелектрон. фіз.* – 2011. – Т. 3, № 4. – С. 106–113.
21. Лукашевич М.Г. Введение в магнитоэлектронику: курс лекций для студентов физического факультета/ М.Г. Лукашевич // Мн.: БГУ, 2003.

22. First-principles calculations of electrical conductivity and giant magnetoresistance of Co/Cu/Co spin valves / W.H. Butler, X.G. Zhang, D.C. Nicholson [et al.] // Phys. Rev. B. – 1995. – Vol. 52, № 18. – P. 13399 – 13410.
23. Сема Е.О. Електронні датчики магнітного поля: технологічні і фізичні параметри / Е.О. Сема, Т.В. Шкарупа, Ю.М. Шабельник // Фізика. Електроніка. Електротехніка :: 2021: Матеріали науково-технічної конференції студентів та молодих вчених, 19-23 квітня 2021 р. – Суми, СумДУ, 2021. – С. 63.