

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Сумський державний університет
Факультет електроніки та інформаційних технологій
Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри

_____ Іван ПРОЦЕНКО
_____ 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня бакалавр

зі спеціальності 171 Електроніка освітньо-наукової програми «Електронні інформаційні системи»

на тему: Фізичні принципи функціонування датчиків магнітних характеристик

Здобувача (ки) групи ЕП-91 Северин Назар Віталійович
(шифр групи) (прізвище, ім'я, по батькові)

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ Назар Северин
(підпис) (Ім'я та ПРІЗВИЩЕ здобувача)

Керівник к.ф.-м.н. доцен Наталія Шумакова _____ (підпис)
(посада, науковий ступінь, вчене звання, Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

Консультант¹⁾ _____ (підпис)
(посада, науковий ступінь, вчене звання Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота викладена на 31 сторінках, зокрема, містить 11 рисунків, 0 таблиць, список використаних джерел із 18 найменувань.

Актуальність теми: Актуальність теми полягає в тому, що магнітні характеристики є важливими параметрами в багатьох галузях, включаючи магнітну технологію, електроніку, енергетику, медицину, наукові дослідження та багато інших. Датчики магнітних характеристик дозволяють вимірювати, контролювати і оптимізувати магнітні параметри для різних застосувань, таких як детектування, неруйнівний контроль, магнітна резонансна томографія (МРТ), магнітне зберігання інформації, магнітні датчики безпеки та інші технології. Завдяки постійному розвитку інформаційних технологій, розширенню промислових застосувань та вимогам до точності та ефективності систем, дослідження і розвиток датчиків магнітних характеристик є актуальними і важливими для подальшого прогресу в цих галузях.

Мета кваліфікаційної роботи бакалавра полягає в розгляді, вивченні та аналізі фізичних принципів функціонування датчиків магнітних характеристик, зокрема датчиків, що працюють на основі магнітокалоричного ефекту. Основна мета полягає в дослідженні теоретичних аспектів цих датчиків, їхніх принципів роботи, властивостей та потенційних застосувань.

Під час виконання роботи використовували експериментальні та математичні методи, лабораторне обладнання, методи аналізу даних.

У результаті проведених наукових досліджень встановлено, що датчики магнітних характеристик засновані на багатьох ефектах, виготовляються з багатьох типів металів, мають широке використання в багатьох сферах діяльності.

Ключові слова: Датчик, Ефект, Магнітна Індукція, Ферромагніт, чутливий елемент.

ЗМІСТ

ЗМІСТ	3
ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ 1.....	5
КЛАСИФІКАЦІЯ ДАТЧИКІВ МАГНІТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК	5
1.1.Класифікація та види датчиків магнітних характеристик	5
1.1.1.Датчики Ефекту Холла.....	5
1.1.2.Датчик магнітної індукції	6
1.1.3.Датчики Віганда	8
1.1.4. Датчик SQUID	8
1.2. Ефекти на яких базуються датчики	10
РОЗДІЛ 2.....	19
ЧУТЛИВІ ЕЛЕМЕНТИ ДАТЧИКІВ МАГНІТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК.....	19
2.1.Фізичні параметри чутливих елементів датчика Холла.....	19
2.2. Фізичні параметри чутливих елементів датчика Віганда	21
РОЗДІЛ 3.....	23
МАГНІТОКАЛОРИЧНИЙ ЕФЕКТ.....	24
3.1. Принцип роботи датчиків на основі магнітокалоричного ефекту.....	24
3.2. Теоретичні відомості.....	25
ВИСНОВОК	30
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	31

ВСТУП

Датчики магнітних характеристик - це важливий клас пристроїв, які забезпечують надійне вимірювання різних параметрів на основі взаємодії з магнітним полем. Їх широко використовують в різних галузях, таких як медицина, промисловість, автомобілебудування, космічна техніка та інші. Фізичні принципи, що лежать в основі роботи датчиків магнітних характеристик, зазвичай пов'язані з взаємодією магнітних полів з матеріалами, які є чутливими до магнітного поля. Ці матеріали можуть мати різні властивості, такі як магнітну пермеабільність, електричну провідність, резистивність, ефект Холла, ефект Віганда та інші. Датчики магнітних характеристик можуть бути використані для вимірювання різних параметрів, таких як магнітна індукція, кутова швидкість, відстань та інші. Вони можуть бути виконані у вигляді датчиків відстані, магнітних датчиків кутової швидкості, магнітних датчиків електромагнітних полів тощо. У даній темі ми будемо розглядати фізичні принципи роботи датчиків магнітних характеристик, їх особливості та застосування в різних галузях.

РОЗДІЛ 1

КЛАСИФІКАЦІЯ ДАТЧИКІВ МАГНІТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

1.1.Класифікація та види датчиків магнітних характеристик

Магнітний датчик зазвичай відноситься до датчика, який перетворює величину та коливання магнітного поля в електричні сигнали. Магнітні поля, прикладом яких є магнітне поле Землі (земний магнетизм) або магніти, є звичними, але невидимими явищами. Магнітні датчики, які перетворюють невидимі магнітні поля в електричні сигнали та у видимі ефекти, вже давно є предметом досліджень. Це почалося десятиліття тому з датчиків, що використовують ефект електромагнітної індукції, і ці зусилля були розширені до застосування гальваноманітного ефекту, ефекту магнітоопору, ефекту Джозефсона та інших фізичних явищ.[3]

Магнітні датчики поділяються на різні типи залежно від використовуваних технологій або елементів, таких як феррозонди, котушки, елементи Холла, датчики світлової накачки, магніторезистивні, ядерної прецесії, SQUID, магнітні тунельні переходи, гігантський магнітний опір, п'єзоелектричний компонент, оптичні волокна, малі електроприводи. -механічні елементи тощо.[4]

1.1.1.Датчики Ефекту Холла.

Вони використовуються для перетворення збереженої енергії в полі магніту в електричний сигнал за допомогою напруги між кінцями струмопровідного дроту, сторони якого розташовані під кутом 90 градусів до магнітного поля. Він працює за принципом ефекту Холла, розробленого Едвіном Х. в 1879 році. Магнітна чутливість елемента Холла не така хороша, як у сенсорного елемента магнітного опору. Однак як магнітний датчик, який не залежить від магнітного матеріалу, він може використовуватися в середовищі

ферромагнітного поля або в суворих умовах і тому знаходить застосування як датчик струму або як різноманітні магнітні перемикачі.



Рисунок 1.1 Датчик Холла[19]

Датчики на ефекті Холла можуть надійно працювати в різних електромагнітних середовищах і користуються високою повагою та любов'ю виробників. До звичайних застосувань належать датчики нафти, які в основному використовуються для виявлення поплавців у масляних баках. Його також можна використовувати для безщіткових двигунів для визначення положення ротора та визначення часу струму. Коли магнітний датчик інтегрований з іншими схемами, виробничий процес не потребує спеціальних матеріалів або спеціальної обробки, що допомагає зменшити витрати на проектування.

1.1.2. Датчик магнітної індукції

Цей датчик містить котушку, що оточує ферромагнітний сердечник, проникність якого змінюється залежно від магнітного поля Землі.

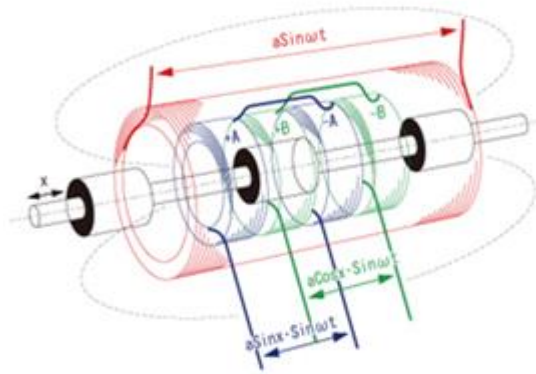


Рисунок 1.2 Датчик магнітної індукції[5]

Датчики магнітної індукції є одним з видів датчиків магнітних характеристик і використовуються для вимірювання магнітної індукції в об'єктах. Ці датчики зазвичай працюють на основі ефекту Холла або ефекту Віганда. Датчики магнітної індукції зазвичай мають дві головні частини: магнітний елемент і датчик. Магнітний елемент може бути зроблений з різних матеріалів, таких як пермалой, ферит, м'яке залізо тощо, і використовується для генерування магнітного поля. Датчик використовується для вимірювання зміни магнітної індукції в об'єкті. Датчики магнітної індукції можуть бути використані для вимірювання магнітних полів, що генеруються електричними пристроями, наприклад, електродвигунами або трансформаторами. Вони також можуть використовуватися для вимірювання магнітних властивостей матеріалів. Датчики магнітної індукції широко використовуються в різних галузях, таких як промисловість, медицина, транспорт, наука і технології. Наприклад, вони можуть бути використані для вимірювання магнітних полів в електромагнітних пристроях, для контролю якості матеріалів у виробництві, а також для вимірювання магнітного поля мозку в медичних дослідженнях.

1.1.3. Датчики Віганда

Принцип дії приладів з датчиками Віганда, заснований на так званому ефекті Віганда, який полягає в неочікуваній зміні магнітної поляризації феромагнітного дроту, що має спеціальний хімічний склад і фізичну структуру, при її приміщенні в магнітне поле, напруженість якого перевищує деяке порогове значення. Таким чином, зміна стану дроту можна реєструвати за допомогою обмотки, намотаної навколо дроту або розміщеної поруч з нею. Датчик Віганда є двухполюсник, що реагує на магнітні поля і виробляє сигнали до декількох вольт за умови, що напруженість керуючого магнітного поля перевищує величину напруженості порога запалювання. Датчики Віганда не потребують будь-якого джерела живлення, їх вихідний сигнал практично не залежить від частоти зміни поля, і їх можна використовувати в широкому діапазоні робочих температур (-196 ... + 175 ° C). Чутливі елементи Віганда застосовуються в витратомірах, датчиках швидкості, кута повороту і положення. Крім того, одне з найбільш частих застосувань цього елемента - системи зчитування ідентифікаційних карт. Принцип дії такої системи заснований на зміні напруженості поля поблизу датчика Віганда при внесенні (прикладанні) в область датчика намагніченою карти.

1.1.4. Датчик SQUID

У магнітних датчиках SQUID термін «SQUID» означає надпровідні квантові інтерференційні пристрої, які використовуються для вимірювання магнітних полів у дуже низькому діапазоні фемтотесла. Це датчики чутливого типу, які використовуються в медицині та нейронауці з кількома пристроями магнітного поля.

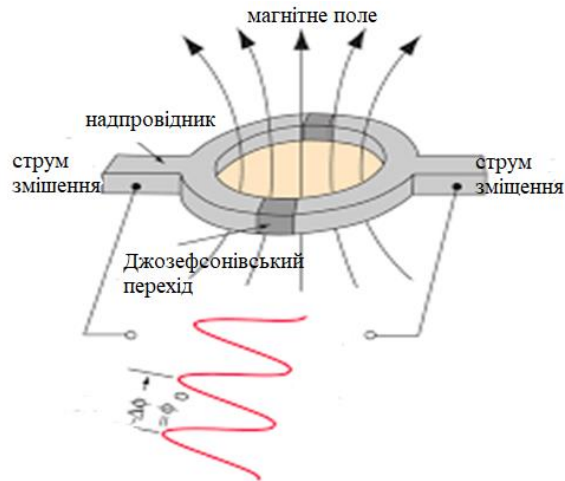


Рисунок 1.3 SQUID датчик[6]

SQUID можна використовувати як магнітний датчик, заснований на принципі проходження магнітного потоку через надпровідне кільце для індукції надпровідного струму. Його роздільна здатність може досягати рівня fT, а роздільна здатність магнітного поля звичайного комерційного SQUID також може досягати порядку 10fT. Можна сказати, що SQUID є сучасним магнітним датчиком, який має сильну здатність виявлення. Однак, оскільки надпровідне кільце може працювати лише при екстремально низьких температурах, СКВІД повинен бути оснащений холодильним пристроєм, що призводить до істотного збільшення його об'єму, ваги та вартості використання, що обмежує область застосування СКВІД. Поява високотемпературних надпровідних матеріалів принесла SQUID нову життєву силу. У 1987 році MKWu та інші повідомили про високотемпературну надпровідну матеріальну систему YBaCuO з критичною температурою 93 K, що означає, що матеріальна система може переходити в надпровідний стан у середовищі рідкого азоту (77 K). У порівнянні з надпровідними матеріалами, що працюють у середовищі рідкого гелію (4K), він має очевидні переваги, оскільки складність приготування та вартість рідкого азоту набагато менші, ніж у рідкого гелію. Таким чином, SQUID на основі високотемпературних надпровідних матеріалів незабаром використовується в біомедицині, геофізичної розвідки, дослідження

матеріалів та інших областях. В даний час це стало гарячою точкою для виробництва високоякісних високотемпературних надпровідних тонких плівок за допомогою технології обробки мікронано для виробництва мініатюрних зондів SQUID. Повідомляється, що вийшов магнітний датчик SQUID, який поєднує в собі планарну котушку MEMS і тонку плівку YBaCuO. Роздільна здатність досягає близько $50\text{fT}/\text{sqr}(\text{Гц})$ (@1 Гц). Незважаючи на те, що електротермічний шум котушки виявлення та коливання температури надпровідного кільця у високотемпературному СКВІД збільшуються, ключові показники нижчі, ніж у СКВІД, що працює в середовищі рідкого гелію, незаперечним є те, що СКВІД прагне до мініатюризації і високотемпературний розвиток. Основним проривним напрямком SQUID стали тонкоплівкові матеріали та технологія шумозаглушення.

1.2. Ефекти на яких базуються датчики

Одним з основних принципів функціонування датчиків магнітних характеристик є ефект Холла. Ефект Холла - це явище, коли поперечна напруга виникає в електропровідному матеріалі, який перебуває в магнітному полі, коли вздовж його проводиться електричний струм.

Це явище було відкрите в 1879 році американським фізиком Едвардом Холлом. Ефект Холла використовують для вимірювання параметрів матеріалів, таких як концентрація носіїв заряду, мобільність, провідність, товщина шару інженерних покриттів та ін. Важливою особливістю ефекту Холла є те, що він залежить від напрямку зовнішнього магнітного поля. Також важливим фактором є розмір і форма електричного провідника.

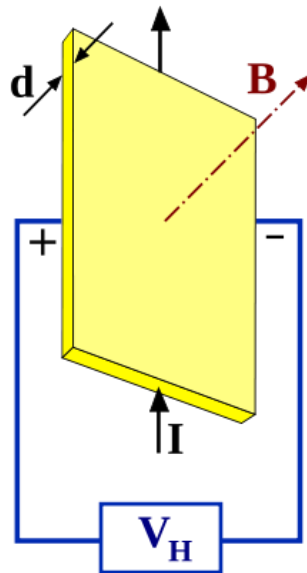


Рисунок 1.4 – схематичний рисунок Ефекту Холла[1]

Причиною цього явища, що отримало назву ефекту Холла, є сила Лоренца, що діє на електричний заряд, який рухається в магнітному полі. Математичний вираз для сили Лоренца має вигляд:

$$f_{\text{л}} = e[vB] \quad (1.1)$$

де e – заряд електрона, v - швидкість зарядженої частинки.

Слід відмітити, що зміщення зарядів і, відповідно, наростання холівської ЕРС при даному струмі та індукції магнітного поля триватимуть до тих пір, поки середня сила Лоренца не зрівноважиться з силою поперечного холівського електричного поля $F_{\text{х}}$, яка діє на носії заряду в напрямку протилежному силі Лоренца (рис. 2 а). Якщо носіями заряду є дірки (їх заряд дорівнює заряду електрона, але протилежний за знаком), то при тій же силі струму I та тій же індукції магнітного поля поперечне електричне поле змінить свій напрямок на протилежний (рис. 2 б).

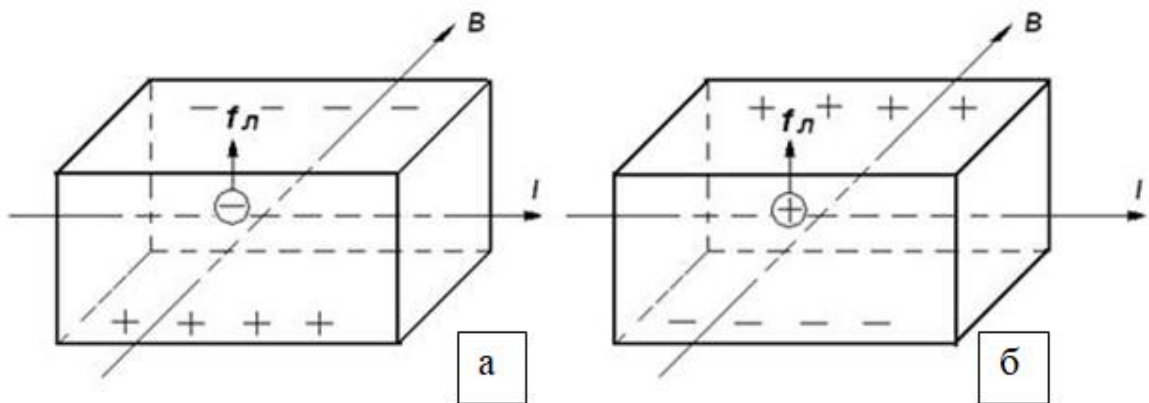


Рисунок 1.5- Виникнення напруги Холла для випадку, коли носіями струму є:

а – негативно заряджені частинки, б – позитивно заряджені частинки.

Отримаємо залежність холівської ЕРС від сили струму та індукції магнітного поля. Якщо вважати, що виникло однорідне поперечне поле, то в стані рівноваги матимемо:

$$eE_x = evB \quad (1.2)$$

Де E_x – напруженість холівського електричного поля. Тут ми вважаємо, що всі електрони мають однакову швидкість дрейфового руху v , яка перпендикулярна до індукції магнітного поля B .

За означенням густина струму j пов'язана із силою струму I співвідношенням:

$$j = \frac{I}{db} \quad (1.3)$$

Де $d \cdot b$ – площа поперечного перерізу зразка. Тоді

$$E_x = \frac{1}{ne} IB \frac{1}{db} \quad (1.4)$$

У реальній ситуації носії струму мають різні швидкості і сила Лоренца, що діє на різні електрони різна. Ті електрони, швидкості яких менші деякої швидкості v , яка отримується з формули (1.2):

$$v = \frac{E_x}{B} \quad (1.5)$$

переміщаються під дією електричного поля до нижньої грані зразка. А електрони, швидкості яких більші v , переміщаються до верхньої грані. У стані рівноваги ці потоки рівні. Отже, рівновага має динамічний характер. Розрахунок, який враховує статистичний розподіл носіїв струму за швидкостями, призводить до виразу:

$$U_x = \frac{k}{ne} IB \frac{1}{b} \quad (1.6)$$

Взагалі кажучи, коефіцієнт k залежить від умов, при яких відбуваються вимірювання. Наближено його можна вважати для різних умов експерименту близьким до 1. Тоді

$$U_x = R_x IB \frac{1}{b} \quad (1.7)$$

Де R_x – стала Холла.

Як ми вже відзначали, знак холівських ЕРС залежить від типу носіїв струму. Для провідника з електронною провідністю $R_x < 0$, а з дірковою $R_x > 0$. Таким чином, знак постійної Холла дозволяє встановити тип носіїв струму. Якщо провідник має змішану провідність (електронну та діркову), то постійну Холла можна розрахувати за формулою:

$$R_x = \frac{3\pi}{8e} \frac{pU_p^2 - nU_n^2}{(pU_p + nU_n)^2} \quad (1.8)$$

Де p – концентрація дірок, n – концентрація електронів, концентрація електронів, U_p та U_n – рухливості протонів та електронів відповідно.

Для невироджених напівпровідників треба враховувати той факт, що носії заряду розподілені по швидкостях згідно закону Максвелла. Тому більш строгі міркування, які враховують цю обставину, приводять до таких виразів сталої Холла:

$$R_x = \frac{r}{ep} \text{ або } R_x = \frac{r}{en}, \quad (1.9)$$

Де – стала, яка називається холл-фактором, і залежить від механізму розсіяння. При розсіянні носіїв заряду на іонах домішки $=1,93$, на теплових коливаннях в атомній решітці на нейтральних домішках $= 1$.

Ефект Холла є важливим інструментом для дослідження властивостей матеріалів і знаходить застосування в різних галузях, включаючи фізику твердого тіла, електроніку, матеріалознавство, магнітну технологію, фізіологію і техніку безпеки. Ефект Холла виникає у матеріалах, які мають електричну провідність, тобто матеріалах, які дозволяють електронам переносити електричний заряд. Якщо такий матеріал піддається зовнішньому магнітному полю, то електрони будуть рухатися по дрібній спіралі через магнітне поле. Цей рух електронів змінює розподіл електричного заряду в матеріалі і відбивається на виникненні поперечної напруги, перпендикулярної до зовнішнього магнітного поля і напрямленої вздовж зовнішнього електричного поля. Ця поперечна напруга, заснована на ефекті Холла, називається напругою Холла. Величина напруги Холла залежить від різниці в електричному потенціалі між двома точками матеріалу, відстань між цими точками, сили зовнішнього магнітного поля та інших параметрів. Зміна величини зовнішнього магнітного поля може змінювати напрямок напруги Холла та її величину. Це дозволяє використовувати ефект Холла для вимірювання параметрів матеріалу, таких як концентрація носіїв заряду та мобільність.

Ефект Холла є важливим інструментом для дослідження фізичних властивостей різних матеріалів, зокрема напівпровідників, металів, напівпровідникових структур, кристалів, а також знаходить застосування у сучасній електроніці, наприклад, для вимірювання параметрів транзисторів, інтегральних схем, датчиків магнітного поля та інших пристроїв. Зокрема, застосування ефекту Холла може бути корисним для вимірювання магнітних

властивостей матеріалів, таких як магнітний момент і гістерезис, а також для вивчення електронних властивостей в магнітних полях.[2]

Ефект Віганда - це ефект, що виникає в спеціально розробленому провіднику, який складається з двох окремих шарів, що взаємодіють один з одним. Перший шар складається з феромагнітного матеріалу, а другий - з немагнітного. Якщо провідник піддається дії зовнішнього магнітного поля, то відбувається зміна магнітної орієнтації в першому шарі, що призводить до зміни магнітного поля в другому шарі. Ця зміна магнітного поля в свою чергу призводить до зміни електричного опору в другому шарі, що може бути виміряно. Відкритий в 1970 році Джоном Вігандом, цей ефект знайшов широке застосування в електроніці, зокрема для створення магнітних датчиків із дуже низькою споживаною енергією. Відносно невеликі зміни магнітного поля можуть призводити до значних змін в електричному опорі провідника, що робить датчики на основі ефекту Віганда дуже чутливими і точними. Оскільки ефект Віганда залежить від магнітного поля, то датчики на основі цього ефекту можуть бути використані для вимірювання різних параметрів, що пов'язані з магнітним полем, наприклад, магнітної індукції, магнітного потоку, магнітного поля від магнітних полюсів і т. д. Крім того, датчики на основі ефекту Віганда використовуються в електронних замках і системах безпеки для детектування магнітного поля.[7]

Іншим фізичним принципом функціонування датчиків магнітних характеристик є ефект магнітної індукції (також відомий як ефект Бюреля)-це явище, яке відображає зміну електричної провідності матеріалу при його піддаванні впливу магнітного поля. Ефект Бюреля був відкритий у 1856 році французьким вченим Шарлем Бюрелем.. Цей ефект полягає в тому, що коли провідник розміщений у магнітному полі, то він стає магнітом і випромінює власне магнітне поле. Інтенсивність власного магнітного поля, що випромінює провідник, залежить від інтенсивності зовнішнього магнітного поля, у якому він знаходиться. Датчики, які використовують ефект магнітної

індукції, можуть вимірювати індукцію магнітного поля. Ефект магнітної індукції зазвичай відображається в надпровідниках, напівпровідниках та ферромагнетиках, а також в кераміці та металевих сплавах. Ефект Бюреля знайшов застосування в багатьох галузях, таких як магнітна резонансна томографія, магнітні датчики та генератори, магнітна запись і зберігання даних, а також в виробництві електроніки.

Одним з ключових параметрів, який описує ефект магнітної індукції, є магнітна провідність (μ). Цей параметр показує, як змінюється провідність матеріалу при збільшенні або зменшенні магнітної індукції. Значення магнітної провідності зазвичай залежить від типу матеріалу, його складу, структури та температури. Ще одним важливим параметром, який описує ефект магнітної індукції, є величина гістерезису. Гістерезис - це затримка зміни провідності матеріалу відносно зміни магнітної індукції. Значення гістерезису залежить від складу та структури матеріалу, температури та змінності магнітної індукції. У більшості випадків ефект магнітної індукції використовується для створення магнітних датчиків. Магнітні датчики вимірюють магнітну індукцію і перетворюють її на вимірювання величини, яка пов'язана з магнітною індукцією, наприклад, на вимірювання положення, швидкості або кутового положення. [8]

Ефект Мессбауера - це явище, пов'язане зі зміщенням енергетичного рівня атомних ядер при взаємодії з електромагнітним випромінюванням. При спектроскопії Мессбауера атомне ядро вбудоване в кристалічну матрицю, де воно може перебувати в різних оточеннях. Якщо ядро належить до різних хімічних елементів, то його енергетичні рівні можуть змінюватися в залежності від хімічного середовища. Це дозволяє визначити структуру і склад кристалу, а також здійснювати контроль за якістю кристалічної речовини.

Формули, пов'язані з ефектом Мессбауера, пов'язані з розрахунком частоти електромагнітного випромінювання, яке поглинається або випромінюється атомним ядром під час проходження його через кристал. Основні формули, пов'язані з ефектом Мессбауера, включають в себе:

Формула для енергії Мессбауера:

$$E = (h/2\pi) * (\Delta E/E_0 + v/c)^2, (1.10)$$

де E - енергія, ΔE - зміщення енергії, E_0 - енергія стану без зміщення, v - швидкість руху ядра, c - швидкість світла, h - стала Планка, π - число "пі".

Формула для гамма-кванту:

$$E = E_0 * (1 - v/c), (1.11)$$

де E - енергія гамма-кванту, E_0 - енергія гамма-кванту у спокої, v - швидкість руху ядра, c - швидкість світла.

Формула для коефіцієнта Мессбауера:

$$f = \exp(-W/RT), (1.12)$$

де f - коефіцієнт Мессбауера, W - енергія активації, R - універсальна газів

Ефект Мессбауера - це явище взаємодії гамма-кванту з ядром атома, що знаходиться в стаціонарному стані. Ядро може здійснювати безперервну спектральну зміну з енергією, яка залежить від стану, в якому знаходиться ядро. Це явище було відкрито Рудольфом Мессбауером в 1957 році, що отримав за нього Нобелівську премію з фізики в 1961 році. Однією з ключових різниць між ефектами Мессбауера і Холла є те, що ефект Мессбауера дозволяє вивчати стан ядра, а ефект Холла дозволяє вивчати електричні властивості провідників відносно змін зовнішнього магнітного поля. Фізичні принципи функціонування датчиків Мессбауера засновані на ефекті Мессбауера, і полягають в використанні гамма-випромінювання, що випромінюється ядрами, щоб вивчити їх структуру і властивості. Датчики

Мессбауера використовуються в різних галузях, включаючи фізику, хімію, геологію, матеріалознавство, медицину та інші.[9]

РОЗДІЛ 2

ЧУТЛИВІ ЕЛЕМЕНТИ ДАТЧИКІВ МАГНІТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

2.1. Фізичні параметри чутливих елементів датчика Холла

Чутливий елемент датчика Холла - це напівпровідниковий кристал, у якому виникає ефект Холла. Чутливі елементи датчиків Холла можуть бути виготовлені з різних напівпровідників, таких як германій, кремній, галієвий арсенід і інші. Чутливість датчика Холла залежить від розміру і форми чутливого елемента, властивостей матеріалу і робочих умов. Для забезпечення надійного та точного вимірювання магнітного поля чутливий елемент датчика Холла зазвичай захищається від зовнішніх впливів, таких як шум, температурні коливання, електромагнітні інтерференції тощо. В залежності від типу датчика Холла, чутливий елемент може бути вбудований в корпус датчика або бути окремим елементом, підключеним до датчика. Найбільш поширеними застосуваннями датчиків Холла є вимірювання магнітного поля в електроніці, автомобільній промисловості, медичинській техніці, промислового контролю та інших галузях.[11]

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) IIIV 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 2.1 генерує носії заряду завдяки поверхневому ефекту поля, на відміну від звичайного, де носії забезпечуються самим матеріалом [13]

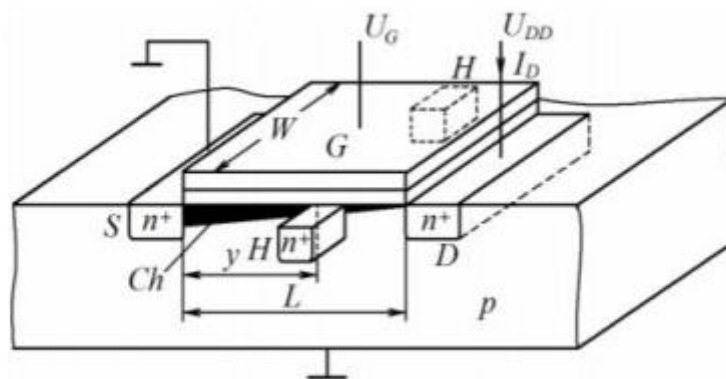


Рисунок 2.1 Структура польового МОН-елемента Холла. Адаптовано із роботи [13]

Чутливий елемент датчика Холла - це тонкий напівпровідниковий прямокутний ділянка, яка має певну довжину, ширину і товщину. Ці параметри впливають на ефективність і точність датчика Холла. Основні параметри чутливих елементів датчика Холла включають:

- Ширина елемента: це відстань між контактами на датчику Холла. Ширина повинна бути достатньою для забезпечення стійкості опору і для уникнення ефектів краю.
- Довжина елемента: це відстань між джерелом зовнішнього магнітного поля та контактами на датчику Холла. Довжина елемента впливає на чутливість датчика Холла.
- Товщина елемента: це відстань між верхньою та нижньою поверхнею елемента. Товщина елемента впливає на чутливість і точність датчика Холла.
- Концентрація носіїв заряду: це кількість носіїв заряду, які є в напівпровідниковому матеріалі чутливого елемента. Вона впливає на ефективність і точність датчика Холла.
- Розмір зразка: це об'єм напівпровідникового матеріалу в чутливому елементі. Розмір зразка впливає на чутливість і точність датчика Холла.
- Температура: температура впливає на опір напівпровідникового матеріалу чутливого елемента і, відповідно, на чутливість датчика Холла.

Всі ці параметри мають бути налаштовані правильно, щоб забезпечити оптимальну ефективність і точність датчика Холла. [12]

2.2. Фізичні параметри чутливих елементів датчика Віганда

Чутливі елементи датчика Віганда зазвичай виготовляються з магнітних матеріалів, таких як феромагнетики або сплави, які мають високу пермеабільність. Ці елементи зазвичай мають форму стрижня або стержня, який розташований в зовнішньому магнітному полі. Зміна магнітної індукції в зовнішньому полі призводить до зміни магнітної індукції в чутливому елементі. Це можна вимірювати за допомогою магнітних датчиків, які можуть бути розташовані навколо чутливого елемента. Залежно від конструкції чутливого елемента, його параметри можуть бути різними.

Наприклад, чутливість може бути визначена як відношення зміни магнітної індукції до зміни магнітного поля, а величина гістерезису може бути визначена як різниця між максимальним та мінімальним значеннями магнітної індукції, які спостерігаються при циклічному зміщенні поля. Для покращення параметрів чутливих елементів датчика Віганда можуть використовуватися різні технології, такі як нанотехнології, що дозволяють створювати елементи з більш точною геометрією та контролювати їх магнітні властивості.[14]

Деякі фізичні параметри чутливих елементів датчиків Віганда включають:

-Магнітна індукція на межі гігантського магнітного опору (GMR) - це значення поля, при якому з'являється максимальний опір GMR. Це значення може варіюватися від датчика до датчика і залежить від складу та товщини шарів GMR.

-Чутливість - це величина, що вказує на залежність вихідного сигналу від змін магнітного поля. Вона залежить від конструкції датчика та може бути змінена шляхом варіювання розмірів та матеріалів.

-Вхідний опір - це опір між виводами датчика. Він може бути високим або низьким залежно від конструкції датчика.

-Лінійність - це властивість, що вказує на те, наскільки лінійно змінюється вихідний сигнал відносно зміни магнітного поля. Чим більша лінійність, тим точніші вимірювання.

-Точність - це властивість, що вказує на те, наскільки точно вимірює датчик магнітні поля. Вона залежить від лінійності, шумів та інших факторів.

-Частотна характеристика - це властивість, що вказує на те, наскільки швидко може реагувати датчик на зміну магнітного поля. Чим швидше, тим більша частотна характеристика.

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 [15].

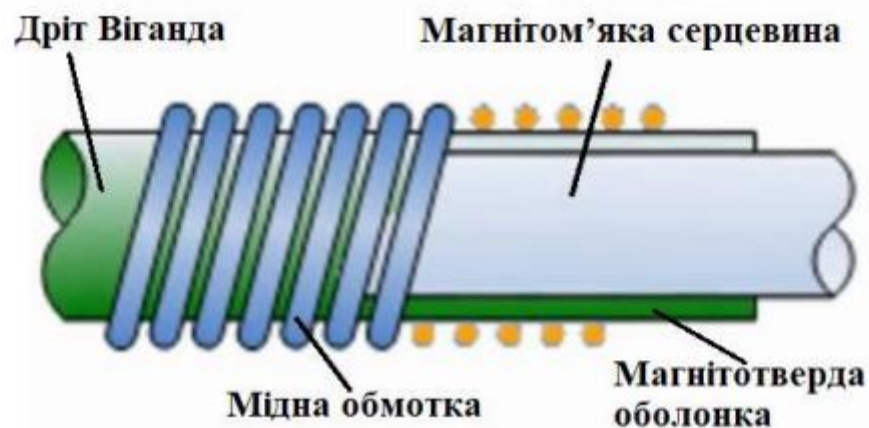


Рисунок 2.2 Будова чутливого елемента Віганда[15]

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.

РОЗДІЛ 3

МАГНІТОКАЛОРИЧНИЙ ЕФЕКТ

3.1. Принцип роботи датчиків на основі магнітокалоричного ефекту.

Датчики на основі магнітокалоричного ефекту використовуються для вимірювання зміни температури при зміні магнітного поля. Принцип їх роботи базується на феномені, відомому як магнітокалоричний ефект, коли зміна магнітного поля викликає зміну температури в певному матеріалі.

Основний принцип роботи датчиків магнітокалоричного ефекту полягає в наступних кроках:

-Вибір матеріалу: Обирається матеріал з властивостями магнітокалоричного ефекту. Деякі матеріали, такі як магнітні сплави, піддаються значним змінам температури при зміні магнітного поля.

-Застосування магнітного поля: Застосовується зовнішнє магнітне поле до обраного матеріалу. Це може бути здійснене за допомогою постійного магніта або електричного струму, що протікає через обмотку.

-Зміна температури: Застосування зовнішнього магнітного поля призводить до зміни температури в матеріалі. Відбувається відбирання або виділення тепла залежно від зміни магнітного поля.

-Вимірювання температури: Зміна температури в матеріалі вимірюється за допомогою датчика температури, який може бути термопарою, термістором або іншим пристроєм.

-Виведення сигналу: Отримані дані про зміну температури перетворюються на відповідний сигнал, який може бути відображений на дисплеї або використовуватися для подальшого аналізу.

Датчики магнітокалоричного ефекту мають деякі переваги, такі як висока чутливість, широкий діапазон робочих температур і немає необхідності в

контакті з вимірюваним об'єктом. Вони застосовуються в різних галузях, включаючи медицину, науку, промислову автоматизацію та енергетику.

Магнітокалоричний ефект - це явище зміни температури в матеріалі при зміні магнітного поля. При певних умовах зміна магнітного поля може призводити до виділення або поглинання тепла матеріалом, що призводить до зміни його температури. Застосування магнітокалоричного ефекту включає:

-Магнітокалоричні охолоджувачі: Деякі матеріали, які виявляють магнітокалоричний ефект, можуть бути використані для створення ефективних охолоджувачів, що не використовують компресори або фреони. При зміні магнітного поля ці матеріали можуть поглинати тепло з оточуючого середовища, створюючи охолоджуючий ефект.

-Температурні датчики: Магнітокалоричний ефект може бути використаний для вимірювання температури шляхом спостереження зміни магнітних властивостей матеріалу. Це може бути реалізовано шляхом вимірювання магнітної проникності або магнітного моменту матеріалу.

-Термомагнітні комутатори: Магнітокалоричний ефект може бути використаний для створення термомагнітних комутаторів, які здатні переключати електричні сигнали при певних температурних порогах.

3.2. Теоретичні відомості

Адіабатична зміна температури, викликана прикладення магнітного поля виражається відомим рівнянням:

$$\Delta T_{od} \approx -\frac{T\Delta S}{C(T)}(3.1)$$

що включає теплоємність сплаву з пам'яттю форми. Температурна залежність теплоємності демонструє виражене підвищення температури діапазон магнітоструктурного фазового перетворення.(представлено на рис 3.1.)

Ступінчаста зміна теплоємності спостерігається при температурі Кюрі $T_C \approx 320$ К. Експериментальна температура залежності теплоємності узгоджується з Рівнянням Дебая яка значно нижче і значно вище температури магнітоструктурного перетворення, якщо $\theta_D = 310$ К і $\kappa = 110$ Дж/К·моль.

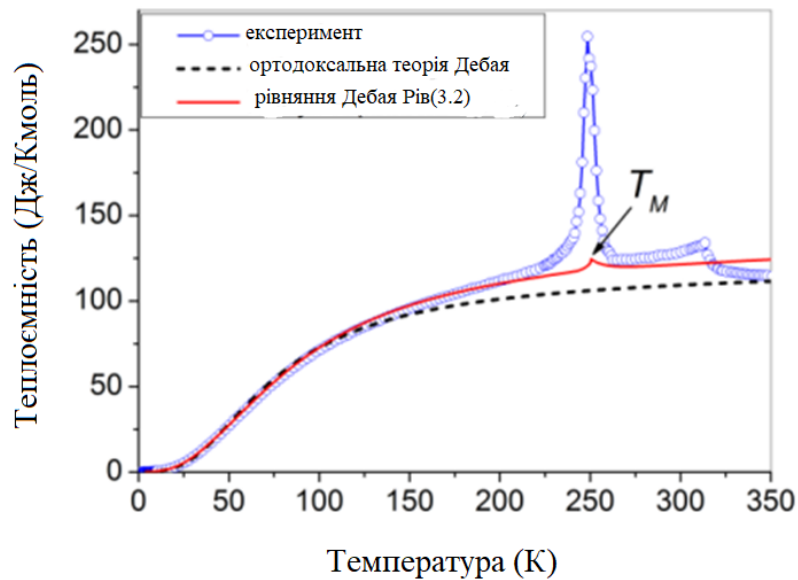


Рисунок 3.1-Графік залежності температур у сплаві Ni₂Mn_{1.4}Sn_{0.6}[16]

Розм'якшення модуля пружності розглядається за рівнянням:

$$C = \kappa \left[\left(\frac{T}{\theta_l} \right)^3 \int_0^{\theta_l/T} \frac{x^4 dx}{4 \sinh^2(x/2)} + 2 \left(\frac{T}{\theta_l} \right)^3 \int_0^{\theta_l/T} \frac{x^4 dx}{4 \sinh^2(x/2)} \right],$$

$$\theta_l = s_l (\hbar / k_B) (6\pi^2 N_A \rho n / M)^{1/3},$$

$$\theta_l = s_l (\hbar / k_B) (6\pi^2 N_A \rho n / M)^{1/3}, \quad (3.2)$$

Відтворити температурну залежність теплоємності в околі магнітоструктурної фази перетворення, слід враховувати розм'якшення модуля пружності, спонтанну деформацію кристалічної решітки ϵ_0 і магнітне впорядкування сплаву.

Враховано вплив магнітного впорядкування та спонтанної деформації на теплоємність рахунок, починаючи з вільної енергії Гіббса сплаву, яка є сумою магнітних і пружних членів:

$$G = G_m + G_{el}(3.3)$$

Різні MMSMA демонструють різні магнітні властивості в їх мартенситних фазах. Тому цим мартенситам можуть бути притаманні різні типи магнітного впорядкування в залежності від хімічного складу та режиму попередньої обробки зразка сплаву. Як нещодавно було показано основні трансформаційні, магнітні та магнітокалоричні властивості Ni-Mn-In і сплави Ni-Mn-Sn задовільно описані починаючи з виразу для магнітної енергії антиферомагнетика з двома магнітними підґратками (див. [17] та посилання в ньому). Ця магнітна енергія може бути виражена як [17]

$$G_m = \frac{J_0(M_1^2 + M_2^2)}{2} + JM_1M_2 - HM(3.4)$$

де M_1 і M_2 – вектори намагніченості дві магнітні підґратки J_0 і J — температурно залежні параметри, які описують магнітний обмін всередині та між ґратками відповідно: H — магнітне поле. Пружна енергія сплаву, який зазнає кубічно-тетрагонального перетворення, виражається як

$$G_{el} = \frac{1}{2}c_2(T)u^2 + \frac{1}{3}a_4u^3 + \frac{1}{4}b_4u^3(3.5)$$

де коефіцієнти $c_2(T)$, a_4 , b_4 позначені в посиланні [18], а змінна $u = 2(c/a - 1)$ пов'язана з параметри решітки a і c тетрагональної решітки. Це змінна дорівнює нулю в кубічній фазі і пов'язана з спонтанною деформацією кристалічної решітки в тетрагональній фазі: $u = 3\epsilon_0$. Теплоємність сплаву можна розрахувати за стандартним термодинамічним співвідношенням:

$$S = -(dG/dT)_p, C_p = T(dS/dT)_p(3.6)$$

Рівняння Для кількісного аналізу температурної залежності теплоємності використовували формули(3.1)-(3.4). Сплав $\text{Ni}_2\text{Mn}_{1.4}\text{Sn}_{0.6}$. Представлено отримані результати графічно на рис. 3.2 для пояснення ролі різні частини енергії Гіббса в МСЕ.

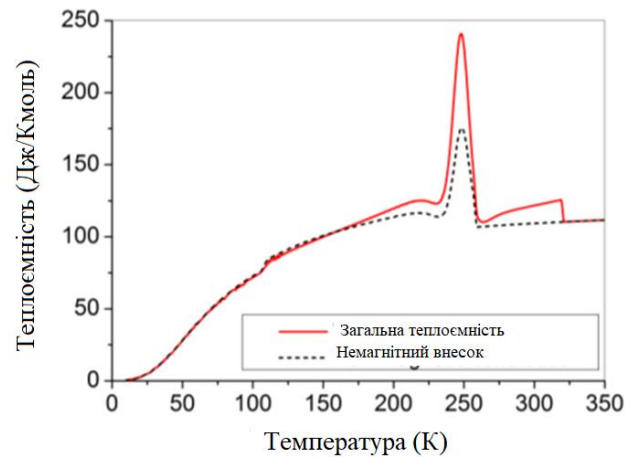


Рисунок 3.2-Теоретична температурна залежність теплоємності розраховано для сплаву $\text{Ni}_2\text{Mn}_{1.4}\text{Sn}_{0.6}$ з урахуванням спонтанної деформації кристалічної ґратки (штрихова лінія).

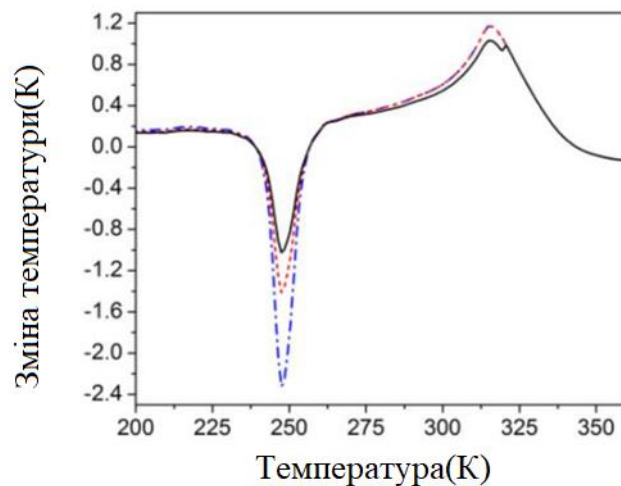


Рисунок 3.3-Теоретичні значення зміни температури, викликані магнітним полем, розраховані з урахуванням лише немагнітних частини теплоємності (пунктирна лінія) і загальна теплоємність значення (суцільна лінія). Зміна температури обчислюється за допомогою рівняння Дебая (показано пунктирною лінією)

На рис. 3.4 показано чудове узгодження між теоретичні та експериментальні [16] значення МКР, отримані для сплаву $\text{Ni}_2\text{Mn}_{1.4}\text{Sn}_{0.6}$.

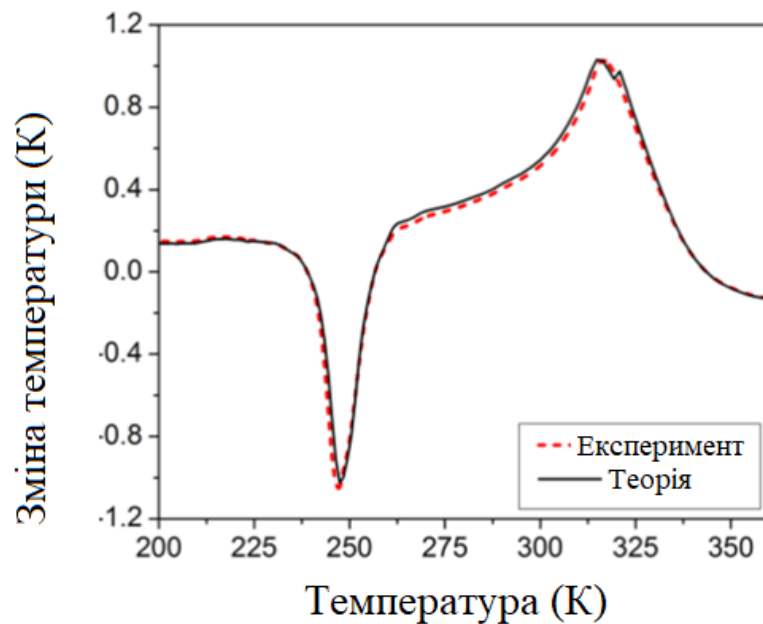


Рисунок 3.4-теоретичне значення ККР порівняно з експериментальними даними, отриманими для сплаву $\text{Ni}_2\text{Mn}_{1.4}\text{Sn}_{0.6}$ [16]

Практично важливе значення, що характеризує в МСЕ – адиабатична температура, викликана магнітним полем зміна (рівняння (3.1)). Взаємозв'язок між загальною і немагнітна теплоємність, зображена на рис. 3.2 для оцінку зміни температури ілюструє рис. 3.3. Зміна температури була розрахована для $\mu_0 H = 2\text{T}$. Мінімум ΔT_{ad} показує зворотний МСЕ, тоді як його максимум відповідає нормальному МСЕ. Видно, по-перше, що зміна температури обчислюється за допомогою Рівняння Дебая для теплоємності більше, ніж зміна температури в результаті значення загальної теплоємності на коефіцієнт 2,5. По-друге, порівняння всього і немагнітних ліній демонструє істотний вплив спонтанної деформації на інверсну МСЕ.

ВИСНОВОК

1. Фізичні принципи функціонування датчиків магнітних характеристик базуються на взаємодії між магнітним полем та електричним струмом. Різноманітні фізичні явища, такі як ефект Холла, ефект Віганда, ефект Бюреля та ефект Моссбауера, є основою для розробки різних типів датчиків магнітних характеристик.

2. Датчики магнітних характеристик використовуються в різних сферах, таких як медична діагностика, контроль за якістю та безпекою промислових процесів, а також в науці та технології. Наприклад, датчики Холла використовуються для вимірювання магнітних полів, датчики Віганда - для вимірювання магнітних властивостей матеріалів, а SQUID-датчики - для вимірювання наднівелєвих струмів та магнітних полів.

3. Оскільки датчики магнітних характеристик дозволяють вимірювати параметри, які іншими методами вимірювання виміряти досить складно або неможливо, вони знаходять все більше застосувань в різних сферах. Водночас, для досягнення високої точності вимірювання необхідна забезпечення високої якості виготовлення та калібрування датчиків, а також точного розуміння фізичних принципів їх роботи.

4. Магнітокалоричний ефект є фізичним явищем, яке виявляється у зміні температури матеріалу при зміні магнітного поля. Це явище використовується для розробки та виготовлення датчиків, які вимірюють температурні зміни, викликані зміною магнітного поля. Датчики на основі магнітокалоричного ефекту мають кілька переваг, що робить їх привабливими для використання в різних галузях. Вони є високочутливими до магнітних полів, мають широкий діапазон вимірювання температур і добре працюють у широкому діапазоні умов.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/53/Hall-Effect-diagram.svg/220px-Hall-Effect-diagram.svg.png>.
2. https://elib.lntu.edu.ua/sites/default/files/elib_upload/1%20%D0%95%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B8%D0%B9%20%D0%BF%D0%BE%D1%81%D1%96%D0%B1%D0%BD%D0%B8%D0%BA%20%D0%B7%20%D1%82%D0%B5%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%BC%D0%B8%20%D0%B3%D0%BE%D1%82%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D0%B9/page23.html
3. <https://www.ablic.com/en/semicon/products/sensor/magnetism-sensor-ic/intro3/>
4. <https://www.watelectronics.com/magnetic-sensor/>
5. <https://www.muratec.net/sensor/img/genri2.jpg>
6. data:image/png;base64
7. A. C. Eringen, "Micromagnetic Theory of the Mössbauer and Vigenère Effects," *Physical Review*, Vol. 133, No. 3A, 1964, pp. A748-A757.
8. The Barkhausen effect and its role in magnetic properties of materials / M. Žukovič, M. Kupka, and J. Kováč // *Acta Physica Slovaca*. - 2014. - Vol. 64. - P. 281-394.
9. B. D. Cullity, *Introduction to Magnetic Materials*, 2nd ed. Hoboken, NJ: Wiley-IEEE Press, 2009.
10. 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.

- 11.K. Yoshida, Y. Uwai, and K. Tsukada, "Hall effect sensor with a thin film of CrO₂", *Journal of Applied Physics*, vol. 51, no. 3, pp. 1596-1598, 1980.
- 12.S. V. S. Nageswara Rao and M. S. Srinivas, "Study of the sensitivity and linearity of a Hall effect sensor with varying geometrical parameters", *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1269, no. 1, p. 012064, 2019.
- 13.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.
- 14.Lee, H. J., & Huh, J. (2019). Sensing characteristics of current-induced auto-oscillations in a spin-torque oscillator-based magnetic field sensor. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 472, 178-182.
- 15.Conductance and giant magnetoresistance of Co/Cu/Co spin valves: Experiment and theory / W.H. Butler, X.G. Zhang, T.C. Schuithess [et al.] // *Phys. Rev. B.* – 1997. – Vol. 56, № 22. – P. 14574 – 14582.
16. V.A. Chernenko, J.M. Barandiarán, J.R. Fernández, D.P. Rojas, J. Gutiérrez, P. Lázpita, I. Orue, *J. Magn. Magn. Mater.* 324, 3519 (2012)
17. V.A. L'vov, A. Kosogor, J.M. Barandiaran, V.A. Chernenko, *J. Appl. Phys.* 119, 013902 (2016).
18. A. Kosogor, N.J. Matsishin, V.A. L'vov, *Phase Trans.* 86, 796 (2013).
19. https://images.prom.ua/4068932112_w640_h640_datchik-holla-ss41f.jpg