

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

Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики

Кваліфікаційна робота магістра

**МІКРОЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ МАГНІТНОГО ПОЛЯ: ПРИНЦИПИ
ФУНКЦІОНУВАННЯ І ТЕХНОЛОГІЧНІ ПАРАМЕТРИ**

Магістрант гр. ЕП.м. – 92

А.С. Редьога

Науковий керівник

канд. фіз.-мат. наук, ст. викладач

Ю.М. Шабельник

Завідувач кафедри ЕЗПФ,

д-р фіз.-мат. наук, професор

І.Ю. Проценко

Суми - 2020

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 38 сторінках і складається з трьох розділів, містить 22 рисунки, 2 таблиці.

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

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. МАГНІТОРЕЗИСТОРИ ТА МАГНІТОДІОДИ (ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД)	6
1.1. Магніторезистори на основі магнітоконцентраційного ефекту.....	6
1.2. Магніторезистори на ефекті гігантського магнітоопору.....	9
1.3. Магнітодіоди та їх властивості.....	13
РОЗДІЛ 2. МАГНІТОТРАНЗИСТОРИ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ХОЛЛА	17
2.1. Властивості та характеристики перетворювачів Холла.....	17
2.2. Характеристики та фізичні параметри магнітотранзисторів.....	21
РОЗДІЛ 3. ВІЗУАЛІЗАЦІЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ	26
3.1. Тонкі плівки для візуалізації магнітного поля.....	26
3.2. Візуалізація магнітної структури нейтронного зображення.....	29
ВИСНОВКИ	35
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	36

ВСТУП

Науково-технічний прогрес тісно пов'язаний з подальшим вдосконаленням якості, автоматизації, створення більш сучасних приладів електроніки та автоматики. Це ж саме стосується і розвитку мікроелектронних сенсорів. Сенсори стають більш точними та більш енергонезалежними, не змінюючи своїх технічних параметрів, а частіше за все – навіть покращуючи їх.

Сьогодні сучасна промисловість є надточною окремою галуззю, що вимагає виконання безлічі технологічних задач задля безперебійності виконання промислового завдання при автоматизації виробництва. Сучасний стан економіки потребує вирішення проблеми, що стосується створення автоматичних засобів діагностики технічних характеристик та параметрів машин та обладнання. Саме мікроелектронні сенсори є одним з варіантів вирішення цього питання.

Звичайно, перед сучасними електронними сенсорами та датчиками ставиться ряд умов, яким повинні задовільняти дані прилади. Це висока точність вимірювання, однозначність, вибірковість (здатність виділення сигналу з іншими зовнішніми факторами, підтримуючи при цьому високу конкурентноспроможність та доступну вартість), багатофункціональність (здатність до одночасного моніторингу декількох різних параметрів, зберігаючи при цьому працездатність у жорстких експлуатаційних умовах), бути надійним та довговічним.

Тому 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.

РОЗДІЛ 1. МАГНІТОРЕЗИСТОРИ ТА МАГНІТОДІОДИ (ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД)

1.1. Магніторезистори на основі магнітоконцентраційного ефекту

Магніторезисторами називають напівпровідникові резистори, умовою яких є те, що під дією магнітного поля відбувається зміна опору. Так як ефект магнітоопору максимальний у напівпровіднику, що є необмеженим в напрямку, перпендикулярному до струму, то в діючих магніторезисторах головною метою є найбільш точніше виконати ці умови. Напряга холлівського електричного поля зменшує магніторезистивний ефект, з чого виходить, що конструкція магніторезистора є такою, яка наближена до процесу відсутності ефекту Холла [2].

Одним з необхідних моментів для використання сенсорів зміни положення, яке може змінюватись з певною невідомою швидкістю для магніторезисторів є певні параметри. Магніторезистори виготовляються з антимоніду індію чи арсеніду індію, з рухливістю $24000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, вони є чутливі до всього магнітного поля, та не залежать від швидкості магнітного поля.

Нижче представлений перелік конструкцій магніторезисторів (рис. 1.1).

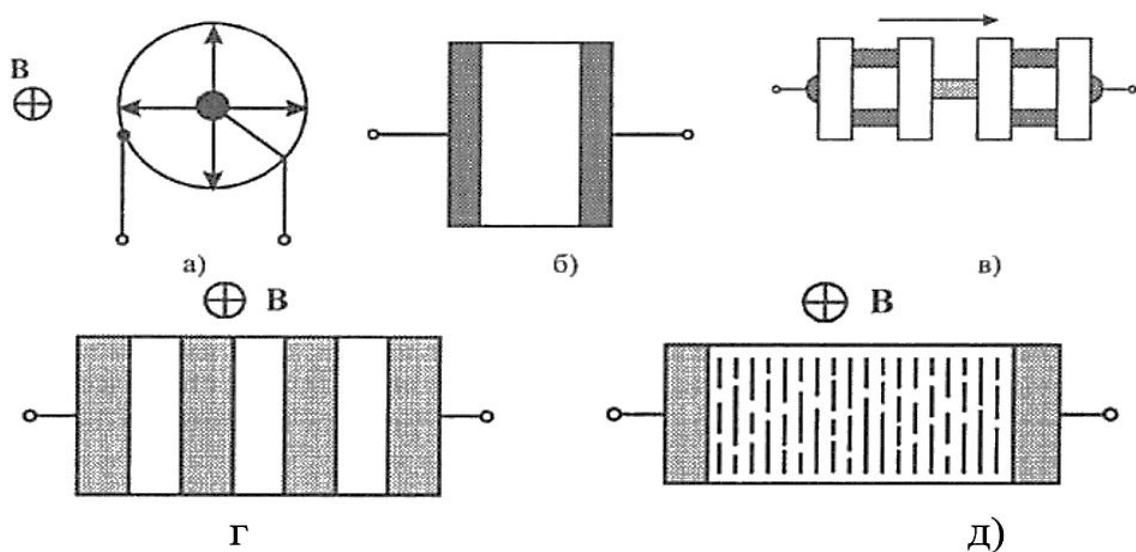


Рисунок 1.1 – Різновиди конструкції магніторезисторів [2]

Розглянемо детально кожен з цих різновидів магніторезисторів. Диск карбіно (рис. 1.1, а) є як приклад необмеженого за шириною зразка. У випадку відсутності магнітного поля струм буде проходити від центра у радіальному напрямку, досягаючи другого електрода, який знаходиться на периметрі диску карбіно. Під дією магнітного поля відбувається процес відхилення носіїв, які проходять відстань перпендикулярно до середини, але так як ми не маємо місця, на якому може відбуватися накопичення заряду, то утворення електричного поля Холла в цьому випадку не спостерігається.

В наступному випадку (рис 1.1, б) конструкція магніторезистора, яка в порівнянні з попередньою (Диском Карбіно) є менш впливовою до магніторезистивного ефекту, це пластина напівпровідника, ширина якого є набагато більшою від його довжини.

Дані структури, що розглянуто в першому та другому випадку мають найбільшу зміну опору в магнітному полі, маючи при цьому один значний недолік, зумовлений конфігурацією саме з низьким абсолютним значенням вихідного опору при $B = 0$. Для того, щоб мати більший вихідний R виконується принцип послідовного зв'язку необхідної кількості даних магніторезисторів. Для послідовного зв'язку декількох конструкцій в формі дисків карбіно, що розглядали в першому випадку, можна їх з'єднати по прикладу, зображеному на рисунку (рис 1.1, в).

Недоліком послідовно з'єднання кількох магніторезисторів (рис 1.1, в) є саме довжина, що проходить в напрямку магнітного поля. Для цього необхідно використовувати великий зазор, але якщо для цього помістити магніторезистор між полюсами магніту, то це призведе до послаблення магнітного поля.

Для уникнення цього недоліку можна використати наступну схему (рис. 1.1, г), де не відбувається процес послідовного зв'язку магніторезисторів. В цьому випадку використовується напівпровідникова пластина певної довжини, зверху якої наносяться металеві смужки, що виконують функцію розділення областей, довжина яких є менша від ширини. Виходячи з цього, в

результаті кожна область є вже окремим, а не цілим магніторезистором. Саме даний принцип розділення смужками цих областей відводить в сторону вплив ефекту та напруги Холла, тим самим збільшуючи магнітоопір. Замість пластини з смужками можна використовувати інший матеріал, головне щоб місця з високою електропровідністю були виконані при створенні нового кристалу. Інакше, можна говорити про некоректність використання та нанесення смужок [2].

Магнітне поле, яке проходить перпендикулярно струму, приводить до переміни основних носіїв заряду та неосновних в напівпровіднику, і тим часом проходить створення нестабільної плазми. Якщо під час рекомбінації нестабільних носіїв швидкість цієї рекомбінації на місці навантаження плазми є швидша за середню по досліджувальному зразку, то такий процес призведе до підвищення процесу рекомбінації та зменшить концентрацію носіїв заряду у досліджуєму зразку, що призведе до загальної картини процесу збільшення опору. Місця з швидкою рекомбінацією приходяться на поверхні напівпровідника. Під час процесу приближення провідності напівпровідника, в результаті росту концентрації електронно-діркової плазми до власної, якщо її порівняти з концентрацією носіїв, яка зумовлена іонізацією домішки, то магніточутливість при цьому буде зростати. Найбільша концентрація проходить всередину напівпровідника на L , незначно більшу від L дифузійного зміщення L_{np} . Тому чутливість найбільша коли $d \approx 1,4 \cdot L_{np}$, де d – це розмір зразка під дією сили Лоренца. Якщо розглянути всі наявні матеріали для створення резисторів, то Германій буде найкращим для вибору створення резисторів на основі магнітоконцентраційного ефекту. Можливості таких магніторезисторів можна ще більш значно модернізувати, створивши на бічній поверхні польовий електрод мдн типу. Для того щоб змінити швидкість рекомбінації, можна провести процес зміни напруги під час якого відбувається зміна швидкості рекомбінації на польовому електроді на боковій поверхні, в результаті чого є можливість змінювати величину магніточутливості [2].

1.2 Магніторезистори на ефекті гігантського магнітоопору

Тонкоплівкові магніторезистивні пристрої на ефекті гігантського магнітоопору дуже часто мають своє використання в різних галузях науки і техніки – авіаційній, космічній, автомобільній, медичній, системах охорони, пристроях пов'язаних з пам'яттю, її запису та зчитування, і т.д. Останніми роками було відкрито саме ефект гігантського магнітоопору (ГМО), яке дало цікавість при різних магнітних полях. На основі цього ефекту були створені нові пристрої, з певними перевагами, серед яких є енергоефективність, малі габарити, зняття показників різних магнітних полів від пТл до декількох Тл, висока технологічність та температурна незалежність. На характеристики даних приладів впливають параметри тонкоплівкових магніторезистивних структур: вісь легкої та важкої намагнічувальності, тощо [5].

Магніторезистивний ефект використовується для створювання датчиків і головок малих розмірів, не втрачаючи чутливості у великих діапазонах і можливістю виготовлення сенсорів та головок цих сенсорів на загальній підкладці, схем обробки сигналів та управління (рис. 1.2) [4].

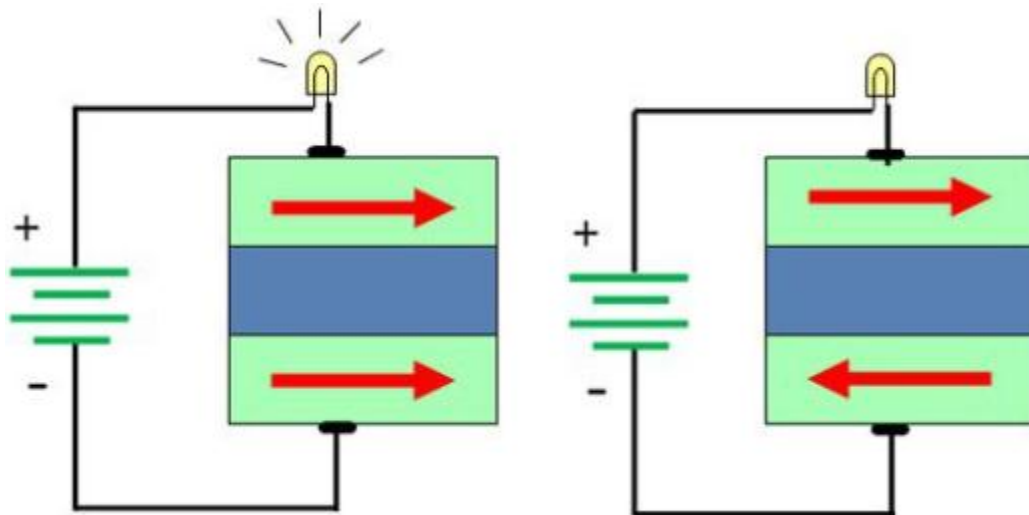


Рисунок 1.2 – Схема виникнення електричного струму в магніторезисторах

Ефект ГМО з'являється у багат шарових плівкових матеріалах, які складаються з Fe і Cr Co і Cu, Co і Ag або Co і Au. Як приклад

магніторезистивні сенсори зчитувальної головки і магнітного поля виконують процес перетворення енергії магнітного поля за рахунок змін опору напруги чи струму в інший, а саме електричний сигнал. Так як даний чутливий елемент в вигляді головки зчитування міститься в складних вимірювальних, обчислювальних чи записуючих умовах, то параметри не повинні впливати на стабільність роботи всієї системи. Магніторезистивні сенсори адекватно використовувати у приладах, де використовуються датчики Холла. Звичайний магніторезистивний сенсор – це звичайна схема, в 4-х місцях якої розташовані магніторезистори. Магніторезистивні сенсори, які складені з кількшарової структури дають можливість користуватись конструкціями з паралельним, та перпендикулярним розташуванням чутливих елементів. У типового датчика 4 гігантські магнітоомні резистори формують міст Уїтстона, в якому напруга, що виходить, є відношенням до зовнішнього магнітного поля, при цьому ТКО цих резисторів (при тому що вони виготовлені з одного матеріалу) буде однаковим [4].

У магнітотранзисторах і магніторезистивних сенсорах концентратори виконують функцію, яка призводить до збільшення напруженості магнітного поля до 10 разів, концентратори виконуються як дві паралельно розташовані кількшарові структури з дуже резистивними чи діелектричними вузькими шарами для розділення між ними, в якому й буде розташований елемент, який є чутливим до магнітного поля. Як приклад, на рис. 1.3 зображена структура чутливих елементів гігантського магнітоопору, а саме – сенсор переміщення та сенсору руху, які працюють на магніторезистивному ефекті, та сенсорі повороту (рис. 1.3).

Для значних магнітних полів в декілька Тесла своє широке застосування знайшли ГМО- та напівпровідникові магніторезистори. На рисунку 1.4 показана чутливість різних МР датчиків.

У магніторезисторних елементах пам'яті, що побудовані на AMR-ефекті використовуються два аналогічні шари, котрі одночасно перемагнічуються. Даний принцип потрібний для зчитування записаної

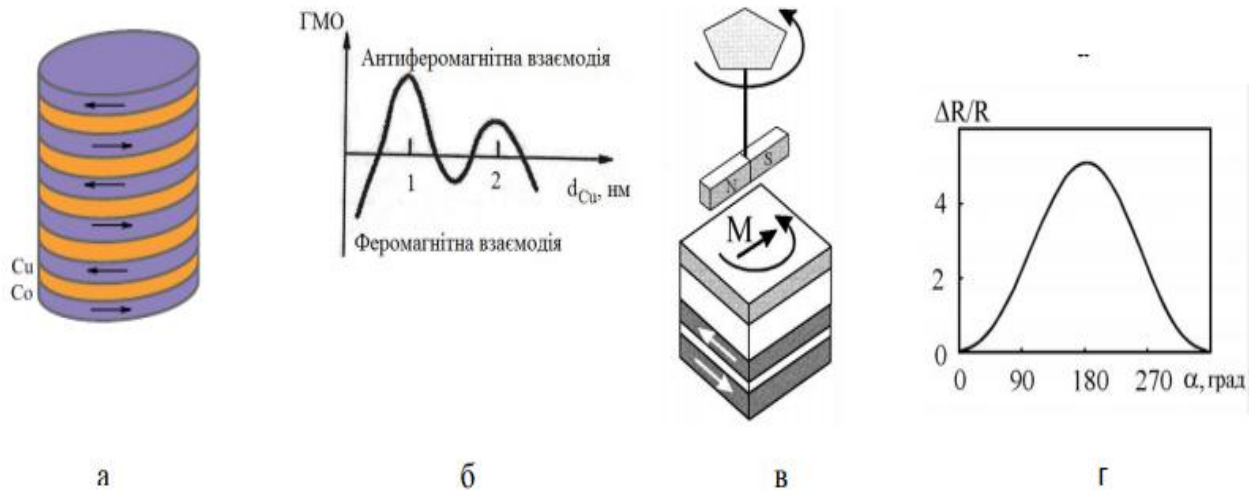


Рисунок 1.3 – Магніторезисторні сенсори на базі багат шарової (а) та спін-вентильної (в) та плівкової структури положення і повороту об’єкта. Залежність гігантського магнітоопору від товщини прошарку (б). Характеристика датчика повороту (г). Адаптовано з роботи [4]



Рисунок 1.4 – Чутливість різних магніторезистивних датчиків.

Адаптовано із роботи [5]

інформації. Часто даний ефект використовують для розробки датчиків магнітного поля по принципу спочатку перетворення магнітного поля саме у зміну опору, а вже далі проходить процес по зміні напруги на виході.

Процес зміни опору практично на 115% при 4,2 К в зв'язку дії магнітного поля, що викликається в блоках, зібраних з тонких шарів металу заліза 3 нм і кобальту 4 нм – називають процесом ГМО. Зміна опору знаходиться наступною формулою:

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{H=H_S} = (R_{H=0} - R_{H>H_S})/R_{H>H_S}$$

де $R_{H=0}$ – опір МР коли зовнішнє магнітне поле відсутнє, $R_{H>H_S}$ – опір магніторезистора при максимальній його намагніченості.

Товщина окремих пластин знаходиться в нанометрових межах. Немагнітний Си поділяє між собою окремі шари Fe чи Co. Дане розділення є дуже тонким, це відбувається коли шар Co приєднується, що приводить до утворення неприродного антиферомагнетика. Зовнішні оболонки (шари) виробляються з магнітних м'яких матеріалів, що намагнічуються в напрямку зовнішнього магнітного поля, але самі пластини Co не міняють намагнічений напрямок у зв'язку дії зовнішнього магнітного поля.

Максимальний опір спостерігається, коли намагніченість зовнішніх і внутрішніх пластин не є паралельною. Точніше це пояснює, що зміна опору пластини, що досліджується, не залежна до розміру магнітного поля, а залежна саме від зміни напрямку цього магнітного поля, так як лише кут впливає на напрямок намагніченості, таким чином призводячи до зміни сумарного опору системи.

Основними параметрами магніторезистора є:

- початковий опір R_0 при $B = 0$;
- магніторезистивне відношення R_B/R_0 ;
- магнітна чутливість S_R ;
- навантажувальна здатність;

- залежність опору від температури.

R_0 залежить від провідності головного матеріалу. Залежно від провідності головного матеріалу отримують наступні результати опору на 1 мм площі магнітрезистора:

для $y = 2,0 \cdot 10^4 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ – приблизно 100 Ом;

для $y = 5,5 \cdot 10^4 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ – приблизно 40 Ом;

для $y = 8,0 \cdot 10^4 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ – приблизно 25 Ом.

Таблиця 1

Параметри декількох типів магнітрезисторів

Параметр	Індукція В, Тл	Тип напівпровідникового матеріалу		
		1	2	3
$\frac{Rb}{R_0}$	0.3	3.0 – 3.2	1.9	1.6-1.9
	1	13 - 18	7-10	6-8
$\frac{1}{B} g \frac{dRb}{T}$ %/°C	0	-1.8	-0.12	-0.16
	0.3	-2.7	-0.35	-0.49
	1	-2.9	-0.50	-0.55

Відхилення R_0 від нормального значення залежить від головного матеріалу та відтворення розмірів. Магнітрезистивне співвідношення – співвідношення опору магнітрезистора при окремих значеннях магнітної індукції до початкового опору. Результати параметрів тих типів магнітрезисторів магнітрезистивного, співвідношення від індукції магнітного поля для власного (тип 1) та легованого сплаву InSb-NiSb (тип 2 та 3) наведено в таблиці 1.

1.3 Магніодіоди та їх властивості

Магніодіод – напівпровідниковий прилад з р-п-переходом і непрямым омичним чи анти-замикаючим контактом, між якими знаходиться площина високого опору напівпровідника (рис 1.5, а).

Магнітодіоди працюють при високому рівні інжекції, коли R бази знаходиться з концентрацією неосновних носіїв заряду. А магніточутливість можна пояснити магнітодіодним і магнітоконцентраційним ефектами при подвійній інжекції цих носіїв заряду. Схему магнітодіода зображено на рисунку 1.5.

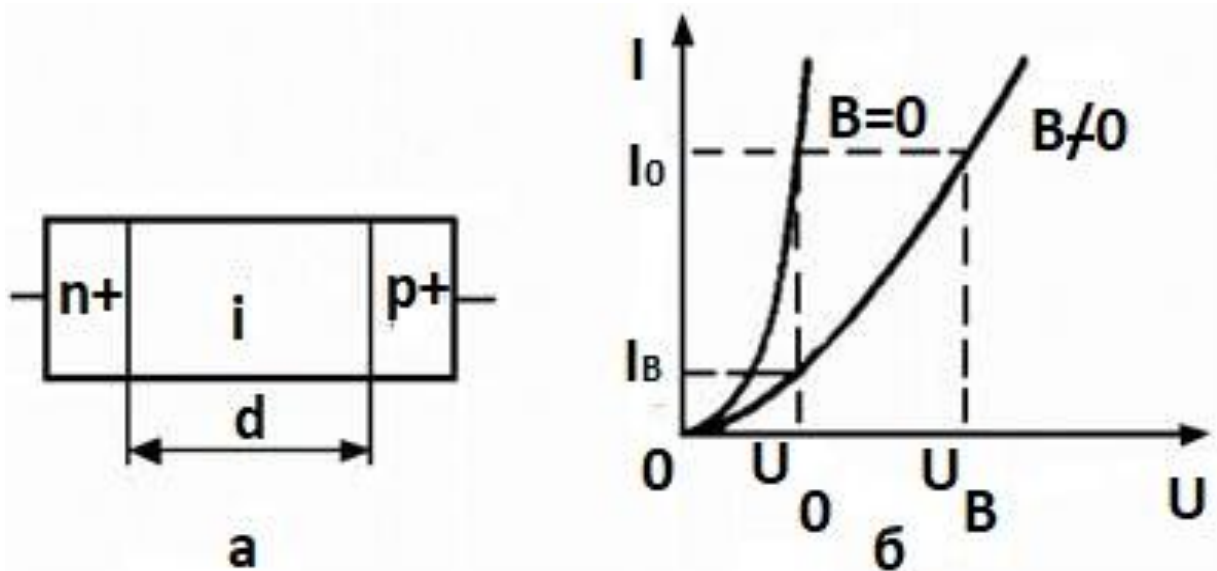


Рисунок 1.5 – Конструкція (а) та вольт-амперна характеристика магнітодіода (б). Адаптовано із роботи [3]

Магніточутливі діоди, які виготовляли декілька років тому, створювалися на базі високоомного кремнію чи германію, але в них була деяка вибагливість до їх розмірів, що унеможливило інтеграцію з технологічною та конструктивною метою в малих електронних пристроях та системах.

Вже більш нові, так звані сучасні магніточутливі діоди, які повинні працювати на магнітоконцентраційному ефекті, створюються за стандартами КНС та КМДН технології, і можуть бути використаними та вбудовуваними до інтегральних схем магніточутливих перетворювачів, що виготовляють за вище вказаними технологічними процесами [1].

Для виготовлення магнітодіодів використовуються такі матеріали, які мають низьку концентрацією власних носіїв зарядів – великою шириною

забороненої зони. Для виготовлення магнітодіодів в основному використовується високоомний кремній. Ширина його забороненої зони $E_g = 1,12$ еВ. Також використовуються антимонід індію, германій, кремній, арсенід галію.

Також існують різні види магнітодіодів, одними з них є торцеві магнітодіоди які виготовляються методом іонного легування та сплавної технології. Особливістю торцевих магнітодіодів є те, що у торцевих магнітодіодах виключається вплив поверхні напівпровідника на параметри, в зв'язку з чим – вони з однаковою чутливістю до магнітної індукції, незважаючи на напрямок цієї індукції. Наступні, планарні магнітодіоди виготовляються за планарною технологією. Це дає змогу поряд з іншими перевагами планарної технології отримувати магнітодіоди із захищеними SiO_2 поверхнями кремнію [3].

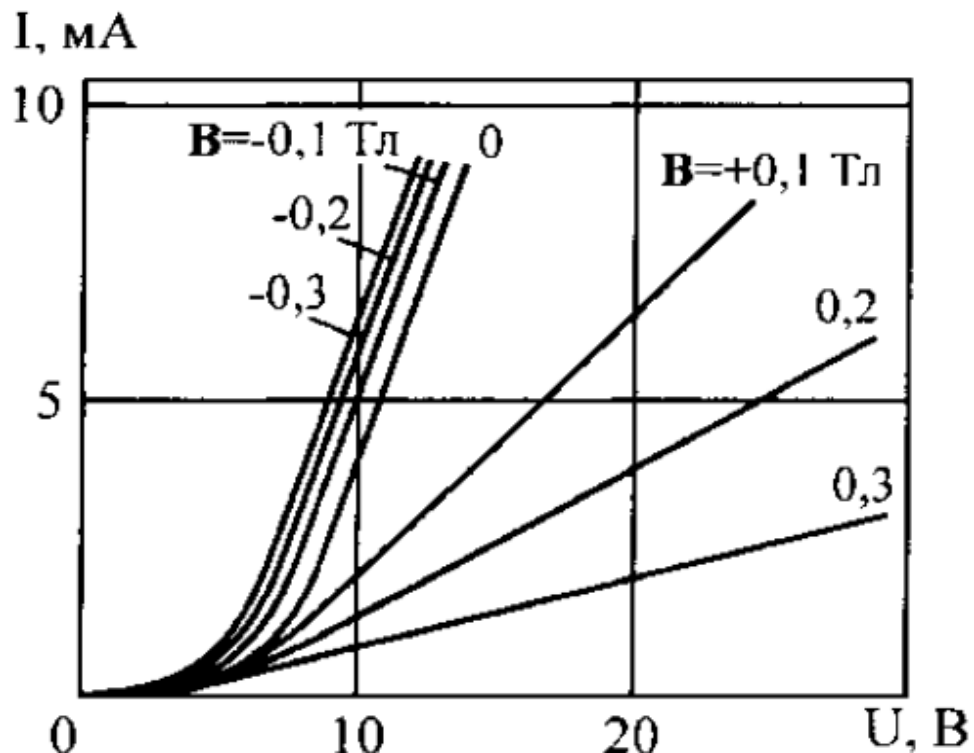


Рисунок 1.6 – Вольт-амперна характеристика магнітодіода з кремнію на основі полярної магніточутливості

Планарна технологія, а також її модифікація з металевим контактом, дає можливість інжектувати нерівноважені носії заряду, та навіть контакт метал-напівпровідник. При відповідному співвідношенні різниці роботи виходу дає можливість різними методами обробки протилежних граней кремнієвої пластини створювати на них ділянки з різними швидкостями поверхневої рекомбінації. Наявністю на протилежних гранях кремнієвої пластини області різних швидкостей рекомбінації, що визначають закономірність магнітостійкості до напрямку магнітної індукції. ВАХ магнітодіодів виготовлених іонним методом, не дуже відрізняється від тих, які виготовлені методом планарно-сплавної технології.

Розглянемо наступний вид магнітодіодів, де знак зміни струму залежить від напрямку магнітного поля – такі магнітодіоди називаються полярними. Якщо збільшити магнітне поле, то ефект полярного магнітодіода зникатиме. Це пояснюється тим, що в потужних магнітних полях струм магнітодіода буде спадати при будь-якому підключенні, це описується перекручуванням потоку струму, що викликає сильне магнітне поле. Дані магнітодіоди виготовляються на основі кремнію р-типу. ВАХ магнітодіода з кремнію на основі полярній магнітостійкості (рис 1.6) [5].

РОЗДІЛ 2. МАГНІТОТРАНЗИСТОРИ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ХОЛЛА

2.1 Властивості та характеристики перетворювачів Холла

Датчик Холла – це пристрій, за допомогою якого вимірюють величину магнітного поля, використовуючи так званий ефект Холла. Датчик Холла містить в собі пластину прямокутної форми з напівпровідника з під'єднаними чотирма виходами. Ефект Холла використовується в різних типах перетворювачів, що призначаються для вимірювання магнітного поля та безконтактних перемикаючих пристроях.

Схематично елемент датчика Холла можна зобразити наступним чином (рис. 2.1).

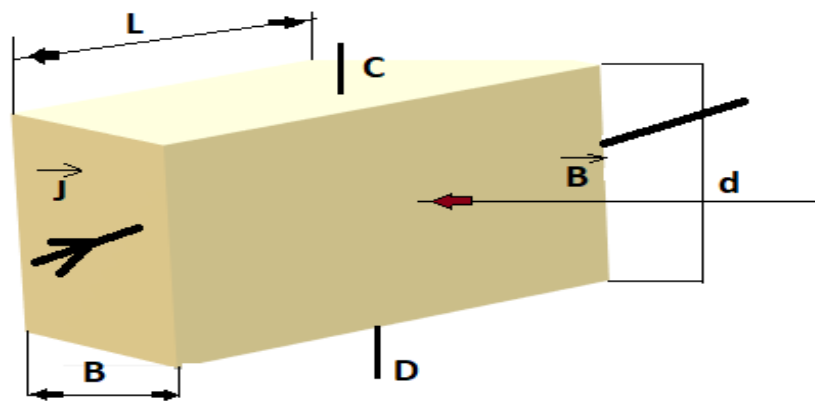


Рисунок 2.1 – Схематично зображений чутливого елемента Холла

Принцип роботи чутливого елемента Холла є наступний: коли уздовж пластинки пропустимо напругу I , а перпендикулярно пластинки створимо магнітне поле – B , тоді на площинах зразка до CD буде створено Холлівське електричне поле. З практичної точки Холлівське поле описується різницею потенціалів, яку можна виміряти між точками CD, які в свою чергу знаходяться на бічній частині пластини. Така різниця цих потенціалів і є – Холлівською різницею потенціалів. З класичної точки зору провідності даний ефект Холла можна описати тим, коли в магнітному полі на рухомі електричні заряди існує саме сила Лоренца. Для створення даних датчиків Холла використовують напівпровідникові пластини з наступних матеріалів - InP, InSb, GaAs, Ge, Si [6].

Основними перевагами перетворювачів Холла є:

- можливість виконання вимірювання не розриваючи ланцюг;
- відсутність гальванічного зв'язку між вхідним та вихідним сигналами;
- немає обмоток, що забезпечує динамічну стійкість;
- є спроможність вимірювання частот в великому діапазоні, навіть при чіткій передачі сигналу частот;
- сигнал, що виходить є будь-яким, а саме: постійний сигнал при постійному струмі, змінний та імпульсний при змінному струмі;
- є спроможність використання в роботі з високою напругою при ізолюванні перетворювача Холла [7].

Чутливість ПХ до магнітної індукції залежить від наступних параметрів:

- струму живлення, за умовою живлення від джерела струму намагаються вибрати якомога більшим. Ця максимальна величина обмежується, можливістю розсіювання перетворювача Холла.

- струм споживання та точність перетворювача Холла змінюються в великих діапазонах в залежності від матеріалу напівпровідника, розмірів перетворювача Холла та наявності тепловідведення.

Якщо розглянути, як приклад, перетворювачі Холла з високоомних напівпровідників серед яких (Ge, Si, GaAs), споживна сила струму доходить до 1 мА, при чутливості до 1 В/Тл. Для перетворювачів Холла на основі низькоопірних напівпровідників (InSb, InAs) споживна сила струму вже доходить до 100 мА, при чутливості – до 5 В/Тл [9].

Для зменшення кроку точності вимірювального пристрою з даним перетворювачем часто використовуються концентратори потоку індукції. Ознайомимося зі схемою концентратора (рис. 2.2, б). Концентратор містить в собі 2 феритові або пермалоеві стержні з розміром певної довжини та діаметром, у вузький повітряний зазор між гранями яких поміщається перетворювач Холла [8].

Дуже велике значення має величина повітряного зазору та розміри цих двох стержнів адже від цього залежить коефіцієнт підсилення магнітної індукції. Залежністю коефіцієнта підсилення нижче (рис. 2.2, а).

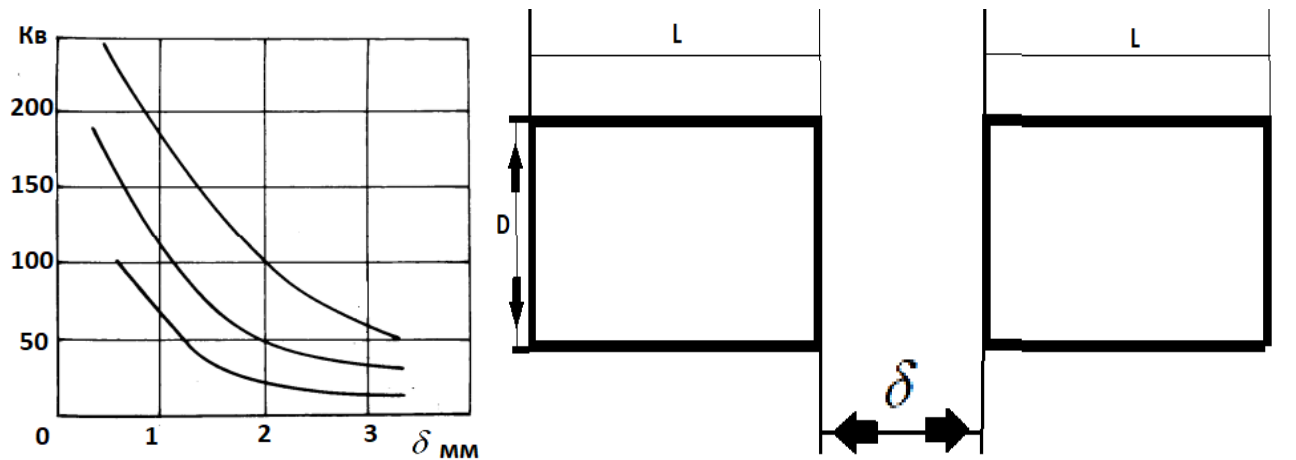


Рисунок 2.2 – Залежність коефіцієнта підсилення концентратора (а) та схема концентратора (б).

Для прикладу, ватметри з перетворювачем Холла складаються з наступних частин: перетворювача або помножуючого пристрою, магнітної та вимірювальної системи, яка містить первинні перетворювачі з вимірювального приладу постійного струму [8].

Недоліками Холлівських перетворювачів є не найвища чутливість, та дуже висока залежність сталої Холла від температури [11].

Застосування Холлівських перетворювачів знаходить своє місце в дуже багатьох приладах та пристроях, серед них: первинні перетворювачі в магнітометрах, приладах контролю зміни параметрів магнітних матеріалів, амперметрах, пристроях вимірювання лінійних і кутових переміщень, тощо. Індикаторні перетворювачі Холла використовуються для встановлення наявності магнітного поля в певному місці [10].

Головними характеристиками перетворювачів Холла є: чутливість – $K_{\text{ч}}$, залишкова напруга при сталій індукції $B = 0$, температурні коефіцієнти чутливості та остаточної напруги, коефіцієнт нелінійності, коефіцієнт розбіжності (зміна чутливості при зміні вектору магнітної індукції).

Таблиця 2.1

Похибки деяких типів перетворювачів Холла

Тип перетворювача	Чутливість при струмі 100мА,В /Тл			Залишок -ова напруга мкВ			ТКЧ К ⁻¹ , ±			Похибка Лінійності при В=0/2 Тл,%, ±			ТК UЗЛ мкВ /К	Розмір-перетворювача мм	Розміри чутливої області мм	Вх та Вих R, ом
	Клас перетворювача															
	А	Б	В	А	Б	В	А	Б	В	А	Б	В				
ПХЕ 602117	0.5	0.3	5 ⁻¹	10 ²	50	20	2 ⁻⁹	0.001	0.0005	-	-	-	5	5x3x0.8	2x0.5	10
ПХЕ 602817																
ПХЕ 605817	0.1	0.08	0.06	30	20	10	0.0003	0.0002	0.0001	2	-	-	2	5x3x0.8 3x2x0.8	2x0.5 1x0.25	3
ПХЕ 606817				50	30	20				-	1	0.5		2x1.5x0.8	0.5x0.15	
ПХЕ 602118																
ПХЕ 605118	0.075	0.05	0.03	30	20	10	0.0002	0.0001	0.00005	1	0.5	0.3	1	5x3x0.8 3x2x0.8	2x0.5 2x0.25	2
ПХЕ 603118																
ПХЕ 606118	0.075	0.05	0.03	100	75	50	0.0002	0.0001	0.00005	2	1	0.5	2	2x3x0.8 2x1.5x0.8	0.2x0.05 0.5x1.15	2

2.2 Характеристики та фізичні параметри магнітотранзисторів

Магнітотранзистори є одним з сучасних сенсорів магнітного поля. До їх особливості відносяться такі параметри: висока магнітна чутливість, простота виконання як елементів інтегральних схем, низьке споживання електроенергії та можливість змінювати та керувати режимами роботи. Якщо розглянути МДН (Метал Діелектрик Напівпровідник) сенсор магнітного поля, то він базується на структурах МДН транзисторів з розщепленим стоком, тоді як в разі біполярних інтегральних схем – на структурі біполярного транзистора з розщепленим колектором, такі структури мають свою назву, а саме: двостокові чи двоколекторні магнітотранзистори [12].

Розрізняють вертикальні та латеральні структури, які відрізняються тим, що перші є з так званим n-p-n типом провідності, а інші є p-n-p типу провідності біполярних структур двоколекторних магнітотранзисторів. Вісь чутливості за магнітним полем вертикальних магнітотранзисторів є паралельною, а латеральних (горизонтальних) – перпендикулярною до поверхні кристала.

Магнітотранзистори – це транзистори, в яких вихідний струм знаходиться та є магнітним потоком, який проходить магнітотранзистор, тоді як решта характеристик та параметрів залежить від магнітного поля. Однією з особливостей магнітотранзисторів є те, що струм який є вихідним є також чутливим і до світлового потоку. Звідси виходить те, що з'являється можливість подвійного безконтактного керування сигналу, який виходить – а саме – такими сигналами як світловий та магнітний потік, що дає можливість розкрити більше можливих функцій магнітотранзистора. [14]

Типи магнітотранзисторів поділяються на такі групи:

- одноперехідні (ОПТ)
- одноколекторні (ОКТ)
- двоколекторні (ДМТ)
- польові (ПМТ).

До одноперехідних магнітотранзисторів відносяться такі магнітотранзистори, що діють на основі модуляції опору бази носіїв заряду, які інжектуються із емітера та мають S-подібну вхідну характеристику, зображену на рисунку нижче (рис. 2.3)

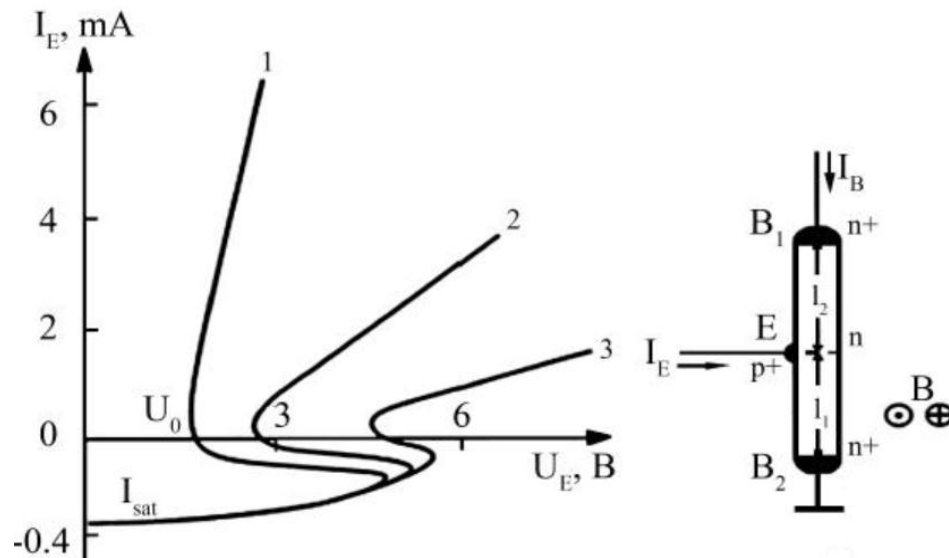


Рисунок 2.3 – Вхідна S-подібна характеристика одноперехідних магнітотранзисторів [15]

Характер кривої під номером 1 зображає, що чим більший час життя інжектованих носіїв в базі, тим глибше вони проникають, і в результаті чого залишкова напруга буде меншою. Якщо транзистор буде поміщеним у магнітне поле на інжектовані носії, почне діяти сила Лоренца, яка від напрямку магнітного поля відхиляє їх до стінок бази або навпаки. Так як темп рекомбінації носіїв заряду біля бази є більшим, ніж об'єм, це призведе до зміни часу життя інжекційних носіїв, U_0 . Магнітна чутливість для ОПТ є величина $2 \cdot 10^3$ В/АТл. Залежність початкової напруги використовують при створенні сенсорів магнітного поля, при роботі на постійному струмі, так і при побудові на них: генераторів з частотним виходом – при залежності частоти такої генерації від манітного поля. Дані генератори дають можливість значно спростити з'єднання датчиків та мінімізувати вимірювальні пристрої [15].

Наступними розглянемо одноколекторні або, так звані, біполярні транзистори, в яких особливість в тому, що області бази, емітера та колектора

розміщені впорядковано в глибину напівпровідника, де в зв'язку дії магнітного поля проходить викривлення напрямку носіїв заряду емітера, до чого приводить збільшення L бази. При цьому на останок ще й проходить відхил носіїв або їх частини від колектора. При розмірах колектора приблизно 0.5 на 0.5 мм відстань становитиме 0.7 мм і при такому розкладі найпотужніша магнітна чутливість відбувається при включенні одноколекторного магнітотранзистора як однополюсника з вимкненою базою. В результаті магнітна чутливість буде складати 200^4 В/Атл. Вхідну характеристику та наглядне розміщення носіїв заряду показано нижче (рис 2.4) [15].

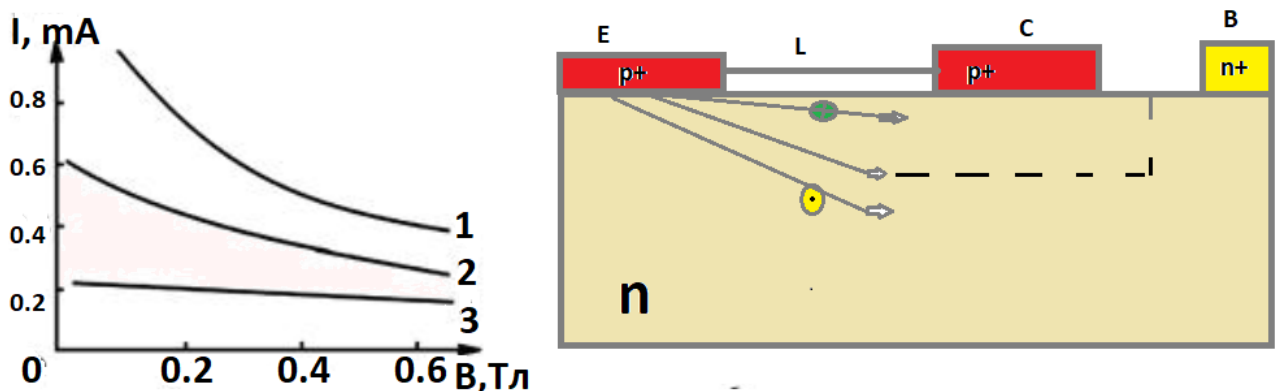


Рисунок 2.4 – Вхідна характеристика та наглядне розміщення носіїв заряду при напрузі 1-25, 20, та 15 В відповідно [15]

Польові магнітотранзистори – польові транзистори, в яких опір каналу може бути як вбудованим так і індукованим, та під дією магнітних полів може змінюватись. Велике застосування сьогодні вони знайшли в місці використання датчика Холла, про сам принцип Холла вже було неодноразово описано в даній роботі. Структуру польового магнітного транзистора можна зобразити наступним чином (рис. 2.5).

Останнім з чотирьох видів магнітотранзистора буде двоколекторний магнітотранзистор який має наступну структурну схему включення (рис. 2.6). ДТМ – біполярні транзистори, де $K1$ і $K2$ розміщені симетрично емітеру. При відсутності магнітного поля U_e поділяється на дві частини, які потрапляють на колектор. Шлях електронів в цьому разі позначені суцільними лініями.

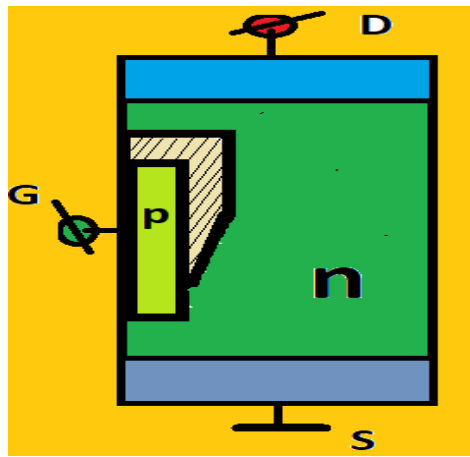


Рисунок 2.5 – Структура польового р-п магнітного транзистора з графічним зображенням стоку виточу та джерела (D; S та G – відповідно).

Адаптовано з роботи [16]

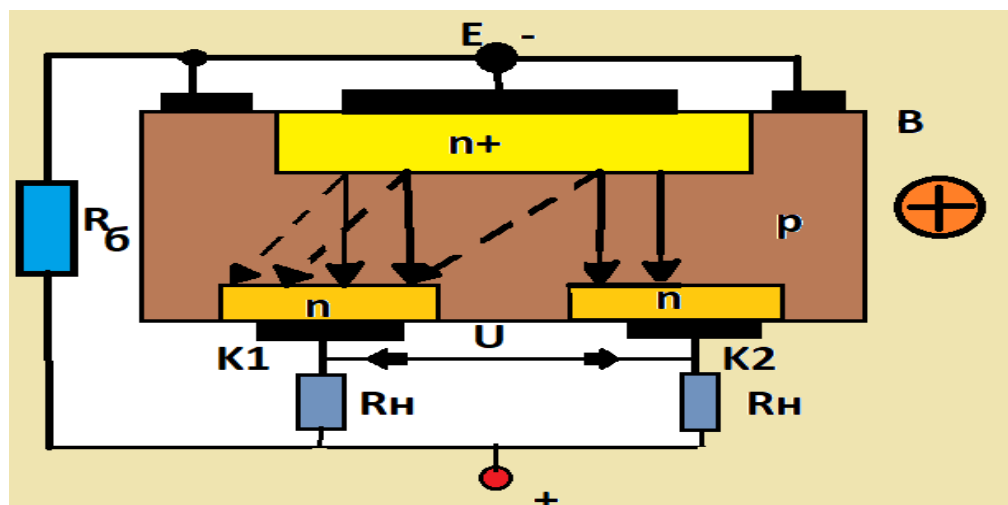


Рисунок 2.6 – Структурна схема включення двохколекторного магнітотранзистора. Адаптовано з роботи [16]

Так як потенціали колекторів однакові, то зменшення U між колекторами дорівнює нулю та вихідна напруга теж дорівнює нулю.

Як тільки на транзистор буде діяти магнітне поле або так званий вектор магнітної індукції, який в такому полі буде напрямлений перпендикулярно до площини, то разом з силою Лоренца електрони струму колектора будуть відповідно відхилятися. Їх дані напрямки руху зображені на рисунку штрихованими лініями. При потряплянні на перший колектор більшої кількості електронів це призведе до того, що його струм збільшиться, тоді як струм другого колектора зменшиться. Між цими двома колекторами з'явиться різниця потенціалів. Увих між $K1$ та $K2$ зі збільшенням B (магнітної індукції) [16].

РОЗДІЛ 3. ВІЗУАЛІЗАЦІЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ

3.1 Тонкі плівки для візуалізації магнітного поля

Тонкі ферромагнітні плівки, так як і ферромагнетики, зображують магнітні властивості в випадку зниження до певної температури. В звичних умовах домени – області з одним напрямом магнітних полів, розташовані неупорядковано всередині плівки. На сьогоднішній день для дослідження магнітних властивостей поверхні плівок використовується метод Біттера.

Механізм дії плівки для візуалізації магнітного поля виглядає наступним чином: на поверхні знаходиться тонкий, але міцний шар магнітних частинок, які під дією магнітних полів можуть змінювати своє положення. Плівка дуже чутлива і допомагає побачити магнітне поле навіть найменшого магніта [14].

Вченими було запропоновано вивчення магнітних полів – їх структуру, використовуючи магнетохімічний ефект. При обробці плівки металу оцтовою кислотою з певною концентрацією, темпи окислення атомів плівки залежать від локального магнітного поля. За пів години залишається малюнок, на якому чудово зображено розміщення доменів – саме на цих місцях, реакція окислення відбувається швидше за все, в результаті градієнта магнітного поля на кордонах плівки (рис 3.1) [19]. На рисунку 3.1, а представлено зображення в нульовому магнітному полі. Добре видно різкі лінії, що розділяють поверхню на ділянки прямокутної форми. б – в зовнішньому магнітному полі з певною напруженістю, паралельному площині плівки. Прямокутні ділянки витягуються в напрямку осі легкого намагнічування. Позиція а та с – в зовнішньому магнітному полі напруженістю 400 Ое, перпендикулярному площині плівки. Спостережувані лінії набувають форму кіл.

Це пояснюється тим, що при відсутності зовнішнього магнітного поля, на мікрофотографіях зразків зображаються явні лінії які поділяють область на певні прямокутні ділянки. В випадку, якщо реакція проводиться під час паралельного магнітного поля, то ділянки витягуються. Коли зовнішнє магнітне поле напрямлене перпендикулярно до плівки, – то на поверхні ферромагнітних плівок лінії набувають форму кіл.

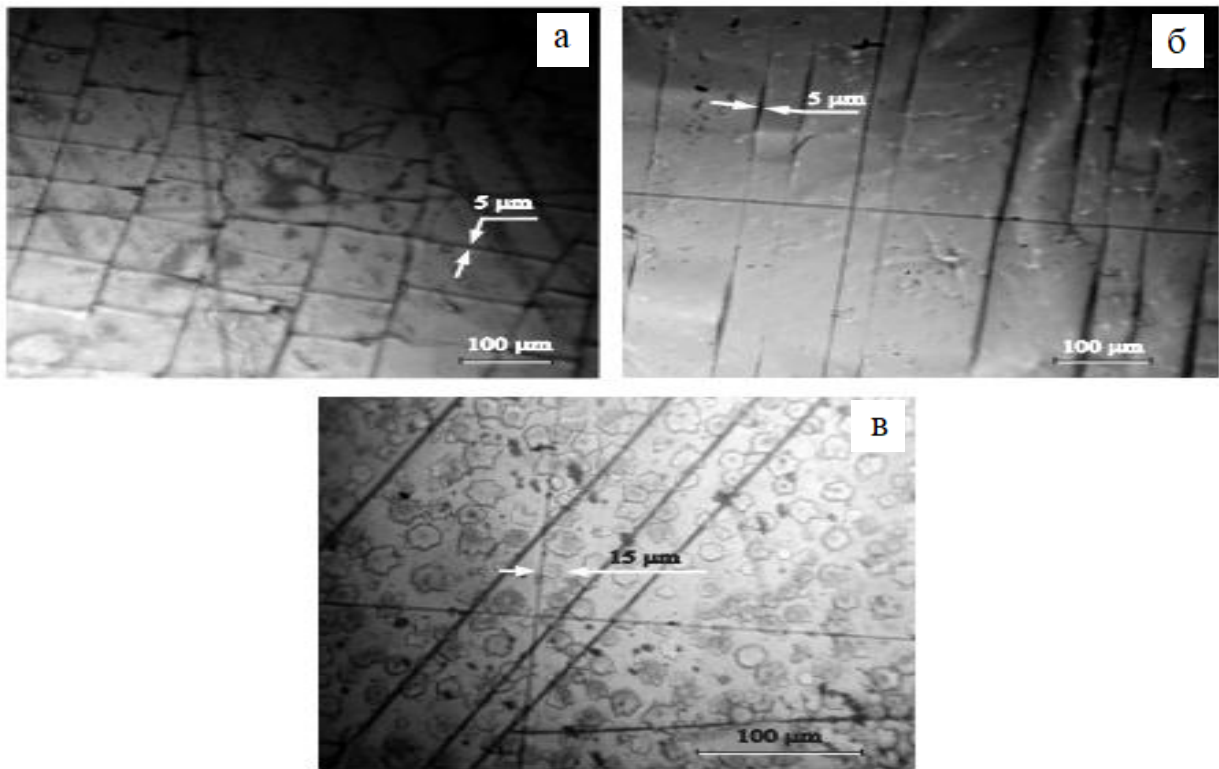


Рисунок 3.1 – Мікрофотографії поверхні плівок оброблених розчином оцтової кислоти. Адаптовано з роботи [19]

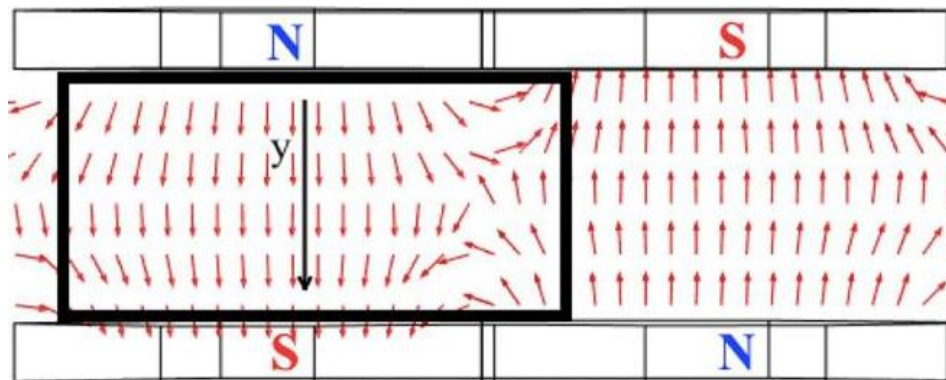


Рисунок 3.2 – Візуалізація магнітного поля між постійними магнітами в місці розташування підкладки, на якій відбувається осадження плівки NiFe / IrMn

В основному використовуються 3 типи монокристалічних плівок феригранатів із вісмутом. Плівки без можливості швидкого релаксування іонів, малим загасанням та високою рухливістю доменів – серед їх є $(\text{Bi}, \text{Y}, \text{Gd})_3(\text{Fe}, \text{Ga})_5\text{O}_{12}$, з підкладками для них з $(\text{Gd}, \text{Ca})_3(\text{Mg}, \text{Zr}, \text{Ga})_5\text{O}_{12}$ в

площині (111). Плівки, які містять підвищене співвідношення значень та значною швидкістю доменів – це $(\text{Bi}, \text{Tm}, \text{Gd})_3(\text{Fe}, \text{Ga})_5\text{O}_{12}$ з підкладкою $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ в тій же площині. Якщо розглянути пластини з ромбовою магнітною анізотропією та високим темпами доменів то це $(\text{Bi}, \text{Y}, \text{Lu}, \text{Pr})_3(\text{Fe}, \text{Ga})_5\text{O}_{12}$ з підкладкою $(\text{Gd}, \text{Ca})_3(\text{Mg}, \text{Zr}, \text{Ga})_5\text{O}_{12}$ з розміщеною як (210) [1].

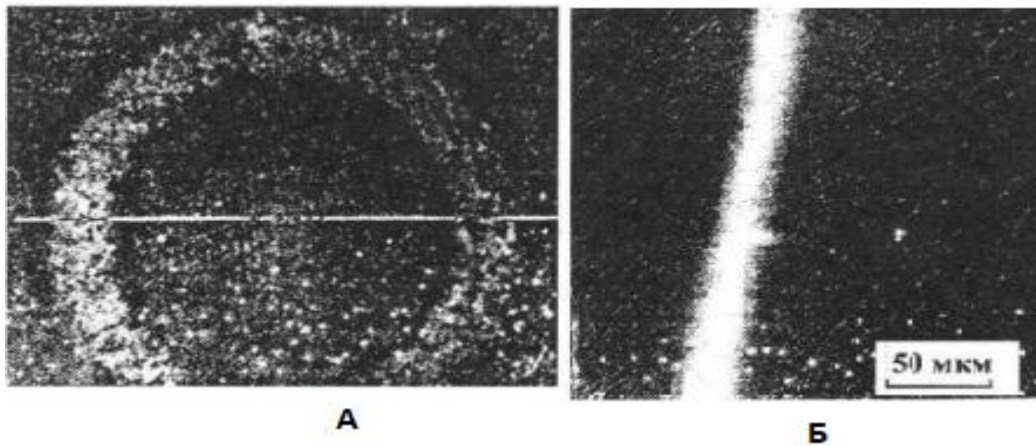


Рисунок 3.3 – Зображення розподілу магнітного поля (а) та зображення магнітного поля (б). Адаптовано з роботи [1]

Зображення розподілу магнітного поля, створеного кільцем діаметром 10 мм, наведена на рисунку 3.3 (а), зображення магнітного поля, з $I = 100$ мкА з $F = 50$ кГц, що проходить на нитці з металу Cu $d = 200$ мкм.

Одним з перших методів візуалізації магнітного поля є метод "Магнітних стружок" (рис. 3.4 (а)) та магнітної суспензії (рис. 3.4 (б)). Цей метод візуалізації за допомогою дрібних (до 20 нм магнітних частинок), диспергованих у різних середовищах (магнітні рідини або суспензії) і зараз застосовується для експресного контролю розподілу поля розсіювання різних джерел. Оптичний контраст створюється завдяки концентрації цих частинок в ділянках з найбільшими градієнтами магнітного поля, а також оптичної анізотропії, виникаючої під дією магнітного поля.

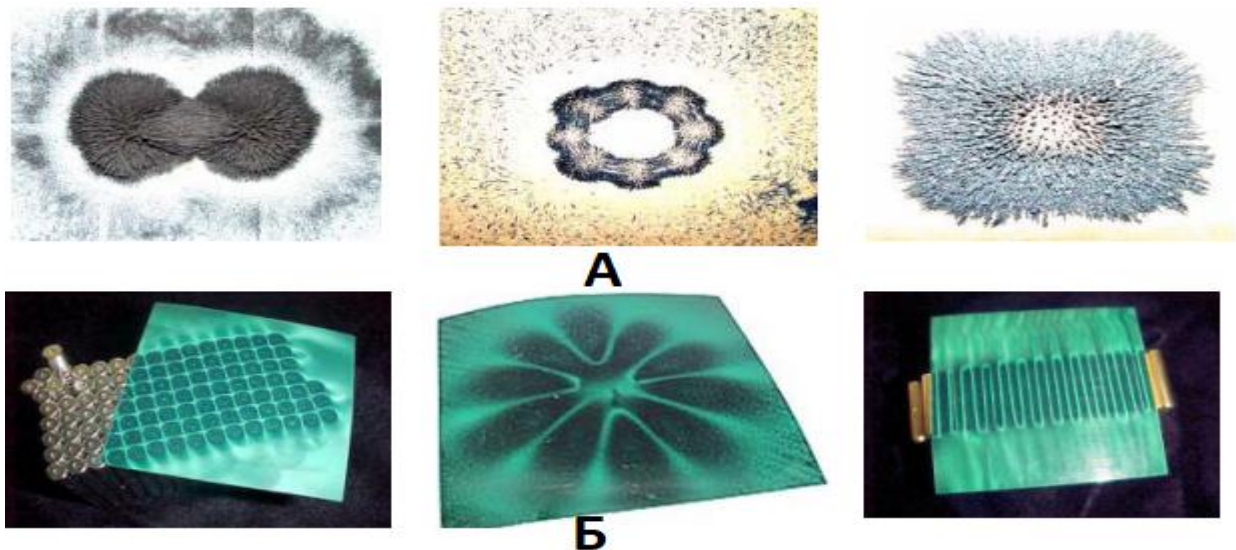


Рисунок 3.4 – Візуалізація полів розсіювання постійних магнітів за допомогою магнітних стружок (а), та візуалізація полів розсіювання магнітних систем за допомогою магнітної суспензії, укладеної між двома прозорими плівками (б)

Аналіз змін доменної структури одношарових плівок, що утворюються при впливі досліджуваного зовнішнього неоднорідного магнітного поля, дозволяє при певних умовах отримати інформацію про розподіл z-компоненти цього поля в площині плівки. Для цих плівок можна виділити два основних типи конфігурацій доменів, які визначаються значеннями градієнта зовнішнього поля [20].

3.2 Візуалізація магнітної структури нейтронного зображення

Електричні сталі з високою проникністю – це сплави на основі заліза та кремнію. Вони в основному надають перевагу магнітним властивостям, та як за звичай ці зразки покриті ізолюючим шаром для зменшення втрат. Використовуємо комбінацію нових реальних просторових поляризованих нейтронних зображень та нейтрон-гратуючої інтерферометрії, заснованих на методах візуалізації темних полів, для вивчення зерноорієнтованого зразка високопроникної сталі з 3% Si товщиною 0,35 мм у даному зразку, об'ємні домени та домени закриття сильно впливають на втрати серцевини. Дана методика забезпечує унікальний зонд для візуалізації магнітних доменних

структур в основній масі зразка. Використовуючи цю методику, можна використовувати магнітну взаємодію спін-поляризованих нейтронів для візуалізації магнітних полів як у вільному просторі, так і в масиві твердих, масивних, непрозорих зразків, з можливістю виявити розподіл магнітного поля як 2D так і в 3D вигляді.

На рисунку 3.5 показані поляризаційні рентгенограми з магнітними доменами, орієнтованими перпендикулярно напрямку спіна падаючого нейтрона (а, б). За наступними зразками (в, г) показані магнітні області, орієнтовані паралельно напрямку спіна падаючого нейтрона. Максимальний контраст візуалізується для магнітних доменів, орієнтованих перпендикулярно до спінової поляризації падаючих нейтронів. У той час як картина повністю зникає для магнітних доменів, орієнтованих паралельно спіринговій поляризації падаючого нейтрона. Важливо згадати, що абсолютна величина

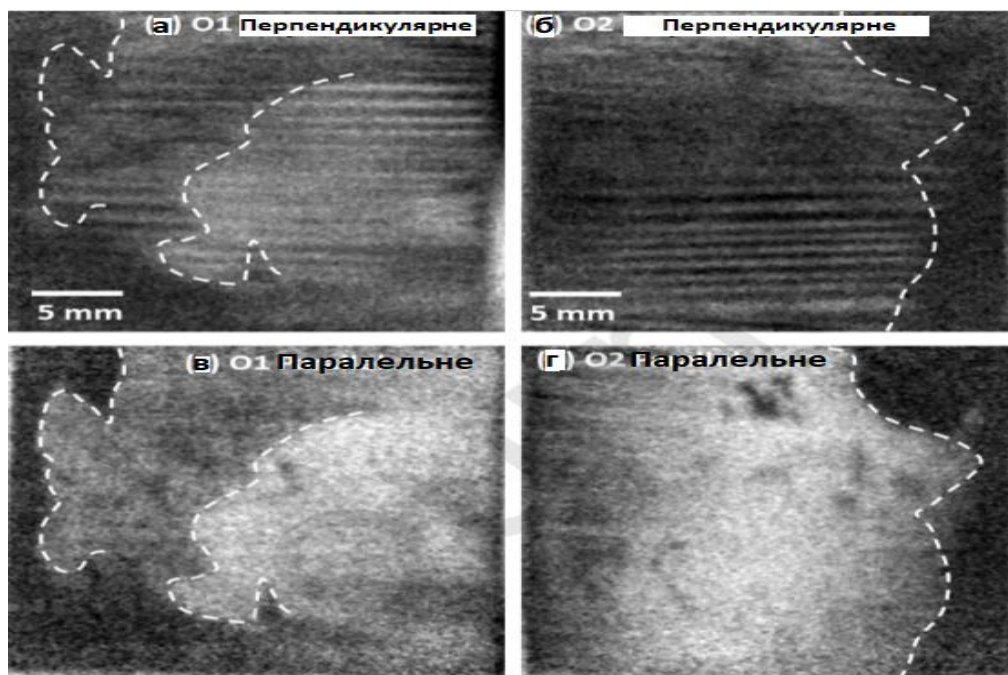


Рисунок 3.5 – Поляризовані рентгенограми нейтронних зображень з магнітними доменами, орієнтованими перпендикулярно відносно падаючого нейтронного спіна для сталі (а, б) та магнітні області, орієнтовані паралельно напрямку спіна падаючого нейтрона (в, г)

передачі через поляризатор / аналізатор також залежить від ефективності поляризації. Окремі домени добре видно на малюнку, що пояснюється великою шириною кожного домену в межах роздільної здатності приладу. Ширина цих магнітних доменів спостерігається до 1 мм.

Для графічної візуалізації впливу кутів обертання зразка щодо падаючого поляризованого нейтронного спіна графік середньої інтенсивності як функція кута повороту зразка 2 зображена на рисунку 3.6

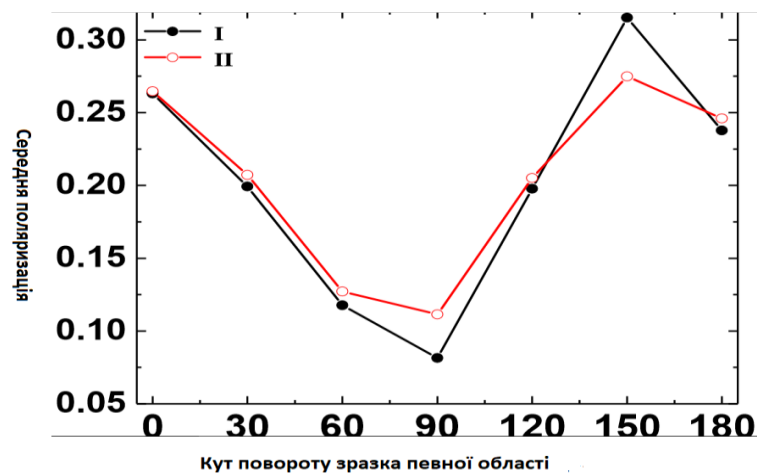


Рисунок 3.6 – Середня варіація поляризації областей, як функція кутів обертання зразка відносно поляризації спінової поля нейтронів у зразку O2 для двох частин, які були використані для цієї ділянки

Для кореляції магнітних доменів можна сегментувати отримані рентгенограми двома методами, для візуалізації основних магнітних доменів, та методом доменних стінок. Були обрані місця з чіткою видимістю (рис. 3.7).

Базові доменні стінки, що спостерігаються за допомогою методу доменних стінок, майже перекриваються з базовими доменами, краще продемонструвати на приблизній схемі, зображеній на рисунку 3.8.

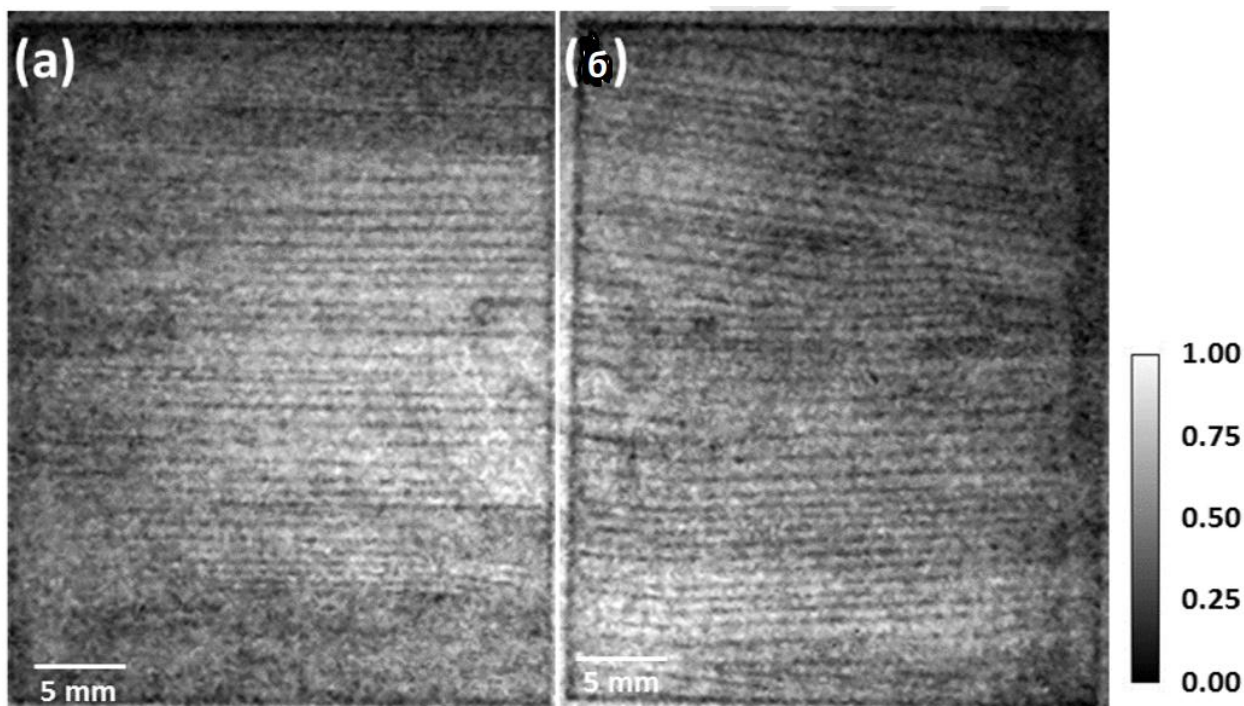


Рисунок 3.7 – Візуалізації основних магнітних доменів для образців сталі з орієнтацією O1 (а) та O2 (б) з 3% Si. Темними горизонтальними лініями зображені стінки магнітних доменів

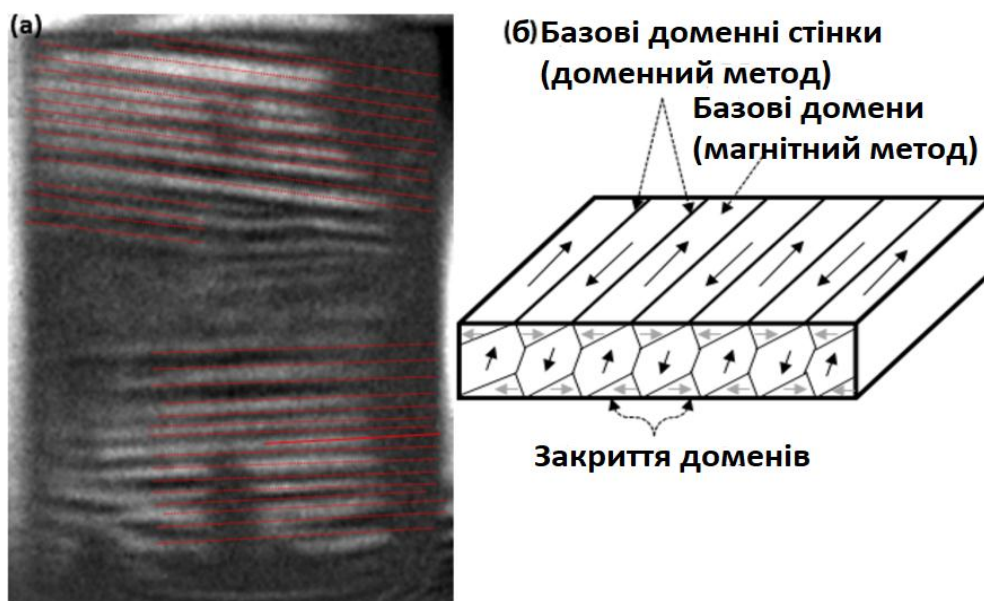


Рисунок 3.8 – Перекриття простежених доменних стінок на рентгенограмах (пунктирними лініями) для зразків сталі, орієнтованих на O2 з 3% Si з товщиною 0,35 мм (а), та приблизна схема структури магнітних доменів (б)

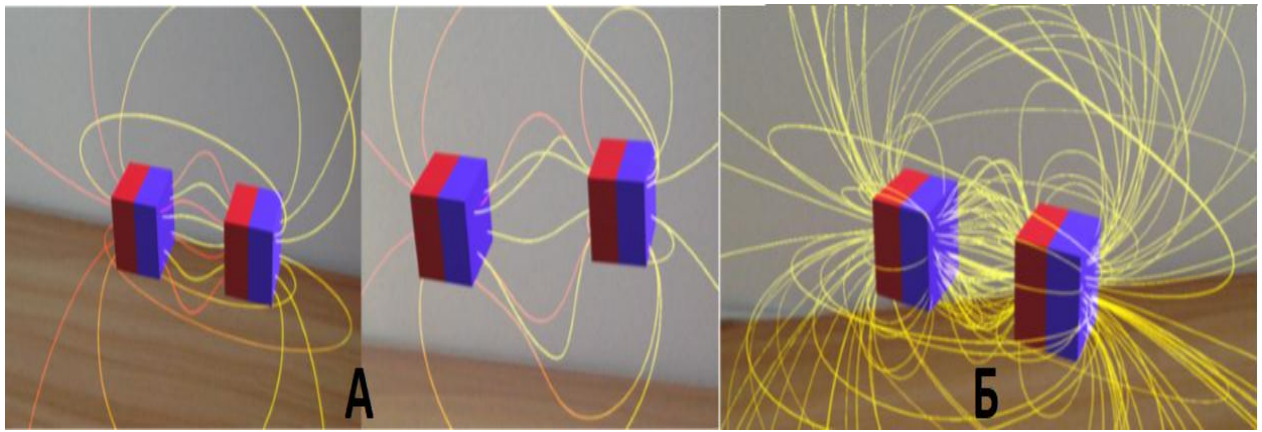


Рисунок 3.9 - Магніти з невеликою кількістю ліній магнітного потоку (а) та магніти з великою кількістю ліній магнітного потоку (б)

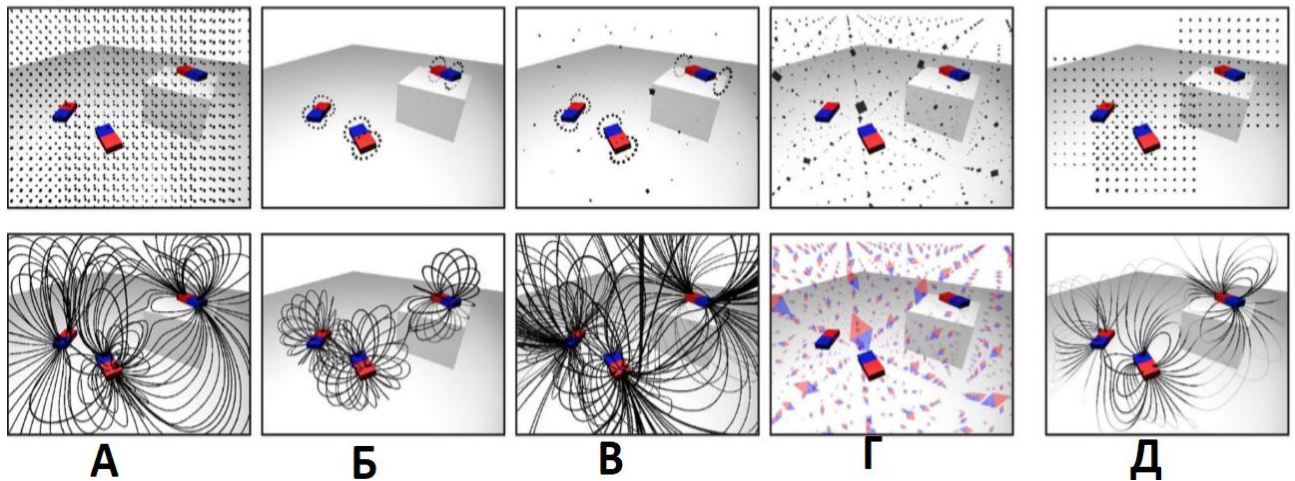


Рисунок 3.10 - Різні методи візуалізації ліній магнітного поля. Шаблони насіння (верхній рядок) та обтичні лінії / компаси (нижній рядок): шаблон, який залежить від перегляду (а), локальний шаблон (б), динамічний шаблон (в) та 3D-компаси (г) з модифікованим шаблоном, який залежить від перегляду (д)

Інтенсивність магнітного поля може бути виражена ступенем щільності магнітного потоку, таким чином бажаний розподіл ліній магнітного потоку з великою кількістю ліній в області високого поля і невеликою кількістю ліній в області низького поля.

Для досягнення мети розрахунку в реальному часі прийнятий алгоритм відстеження частинок. Алгоритм відстеження частинок використовує схему предиктор – коректор для прогнозування майбутнього розташування частинки

на основі локального поля швидкості. Оскільки початковий намір цього методу полягає в тому, щоб пройти шлях адвекції через поле потоку від точкового джерела то ми використовуємо магнітне поле замість поля швидкості.

Одномісна частинка спочатку розміщується у вихідній точці P_0 кожної лінії магнітного потоку. Визначення шляху проводиться починаючи з точки P_0 , можна розрахувати щільність магнітного потоку та використовувати її для прогнозування розташування частинок P' на заданій відстані. У точці P' можна отримати нову щільність магнітного потоку B' і усереднити її, щоб створити скореговану щільність магнітного потоку B'' . Ця скорегована щільність магнітного потоку використовується для пошуку нового місця P_0'' , яке використовується як точка початку руху для наступного кроку відстеження. Ця методика застосовується послідовно, поки лінія магнітного потоку не витікає з області аналізу або не повертається до початкової точки P_0 .

Для прикладу візьмемо лінії магнітного потоку, що генеруються двома постійними магнітами квадратної форми (рис 3.9) з яких видно лінії магнітного потоку, а також розподіл щільності магнітного потоку.

ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз фізичних властивостей мікроелектронних сенсорів магнітного поля, дослідження їх конструктивних та технологічних параметрів, можливості їх застосування як елементів електронних сенсорів.

2. Розглянуто електрофізичні властивості різних типів мікроелектронних сенсорів магнітного поля на основі магнітоконцентраційного ефекту та ефекту гігантського магнітоопору.

3. Застосування Холлівських перетворювачів знаходить своє місце в дуже багатьох приладах та пристроях, серед них: первинні перетворювачі в магнітометрах, приладах контролю зміни параметрів магнітних матеріалів, амперметрах, пристроях вимірювання лінійних і кутових переміщень, тощо. Для створення даних датчиків Холла використовують напівпровідникові пластини з InP, InSb, GaAs, Ge, Si

4. Для перетворювачів Холла на основі низькоопірних напівпровідників (InSb, InAs) споживна сила струму доходить до 100 мА при чутливості – до 5 В/Тл.

5. Найпоширенішими методами візуалізації магнітного поля є метод "Магнітних стружок" та магнітної суспензії. Цей метод візуалізації за допомогою дрібних до 20 нм магнітних частинок, дисперованих у різних середовищах застосовується для експресного контролю розподілу поля розсіювання різних джерел.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Мікроелектронні сенсори магнітного поля: монографія / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 264 с.
2. Конспект лекцій з дисципліни “Мікроелектронні сенсори”/ укладач Н.М.Опанасюк.– Суми : Сумський державний університет, 2013. – 102 с.
3. Фізика процесів у напівпровідниках та елементах електроніки : курс лекцій [навчальний посібник] / Д. М. Фреїк, В. М. Чобанюк, З. Ю. Готра та ін. – Івано-Франківськ : Видавництво Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника, 2010. – 263 с.
4. Електрофізичні і магніторезистивні властивості багат шарових та гетерогенних плівкових матеріалів сенсорної техніки / Науковий консультант – І.Ю. Проценко. На правах рукопису Л.В. Однорець – Суми : Сумський державний університет, 2014. – 347 с.
5. Вісник Національного технічного університету України "КПІ" Серія – Радіотехніка. Радіоапаратобудування.-2008.-№37
6. Давачі / М.В. Бурштинський, М.В. Хай, Харчишин Б.М. – 2-ге вид. доповн. – Львів: ТЗОВ „Простір М”, 2014. – 202 с.
7. Принципи побудови перетворювачів струму на основі датчиків холла / С.Г. Таранов, чл.-кор. НАН України, Ю.Ф. Тесик, докт. техн. наук, В.В. Брайко, канд. техн. Наук та ін. – Київ : Інститут електродинаміки НАН України, 2013. – 8 с.
8. Вісник Національного технічного університету України "КПІ" Серія – Радіотехніка. Радіоапаратобудування.-2007.-№34
9. Прикладні питання математичного моделювання №2 / А.М. Мацуй, В.О. Кондратець Центральноукраїнський національний технічний університет, 2018. – 15с.
10. Єсаулов С. М. Діагностичні комплекси / С. М. Єсаулов, О. Ф. Бабічева ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 13-15с.

11. Методи і засоби вимірювань електричних та неелектричних величин: навчальний посібник / Д.М.Нестерчук, С.О.Квітка, С.В.Галько. – Мелітополь: Виданвико-поліграфічний центр «Люкс», 2017. - 206 с.
12. Матеріали XI-ї науково-практичної конференції «Перспективні напрямки сучасної електроніки» - КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФЕЛ, 2017. – 94-97 с. (електронне видання)
13. Вісник Хмельницького національного університету №3 '2012. – с.75-79 с.
14. Технологія одержання і фізичні властивості плівкових матеріалів та основи мікроелектроніки / І.Ю.Проценко, Л.В.Однорець. – Суми: Сумський державний університет, 2011. – 231 с.
15. Стахів П.Г., Коруд В.І., Гамола О.Є. Основи електроніки: функціональні елементи та їх застосування: підручник / - Львів : Магнолія, 2015.- 206 с.
16. Науковий вісник Чернівецького університету. Том 2, випуск 1. Фізика.Електроніка , 2012. – 25 с.
17. Олег Кулинич., Михаил Глауберман., Владимир Егоров. Магнитотранзисторы: физика, моделирование, применение. – Одесса, 2019. – 137 с.
18. Фізика і технологія тонких плівок та наносистем. Матеріали XI Міжнародної конференції: У 2 т. – Т. 1. / За заг. ред. заслуженого діяча науки і техніки України, д.х.н., проф. Фреїка Д.М. – Івано-Франківськ: Видавничодизайнерський відділ ЦІТ Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника, 2007. – 240 с.
19. Фізика твердого тела / А.В. Агапонова¹ , И.В. Быков¹ , С.А. Маклаков, том 53, вып. 5. – Москва, 2011.
20. Руководство к лабораторным и практическим занятиям «Магнитооптическая установка для изучения доменных и микромагнитных структур в постоянных и переменных магнитных полях». – Екатеринбург, 2007. – 57 с.
21. Visualization of magnetic domain / I. Dhiman, R. Ziesche, L. Riik, I. Manke, A.Hilger, B. Radhakrishnan, T. Burrell, W. Treimer, N. Kardjilov,– 2019.– 7с.

22. Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces / - Osaka, Japan, 2019.
23. Interactive visualization of magnetic / J. Park, K.Lee, J.Han / - Japan, 2015.