

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

Кафедра електроніки,
загальної та прикладної фізики

Кваліфікаційна робота магістра
Магнітоелектронні системи: фізика процесів, технології та характеристики
спеціальності 171 Електроніка

Здобувач вищої освіти гр.ЕП.м-01н

Ю.О.Худякова

Науковий керівник

д-р фіз.-мат. наук, професор

Л.В. Однодворець

Завідувач кафедри ЕЗПФ

д-р фіз.-мат. наук, професор

І.Ю. Проценко

Суми – 2022

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

ЗАТВЕРДЖУЮ
Зав. кафедри ЕЗПФ
І.Ю. Проценко
«02» травня 2022 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА
Худякової Юлії Олегівни

Тема роботи **Магнітоелектронні системи: фізика процесів, технології та характеристики**

затверджена наказом по університету від «18» квітня 2022 р., № 0270-VI

2. Термін здачі здобувачем закінченої роботи 17 травня 2022 року

3. Вихідні дані до роботи (актуальність, мета) Магнітоелектронні прилади та системи широко використовуються в різних галузях промисловості, науки та технологій, наприклад, при дослідженні властивостей матеріалів мікро- і наноелектроніки, випробуванні магнітних елементів, при вимірюванні і контролі магнітних полів. Основними величинами, які характеризують магнітне поле, є магнітний потік, магнітна індукція і напруженість магнітного поля. Мета кваліфікаційної роботи магістра полягала у вивченні фізичних принципів функціонування та конструктивно-технологічних особливостей магнітоелектронних приладів та дослідженні їх робочих характеристик.

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

1. Проаналізувати питання фізики процесів та конструктивно-технологічних особливостей сучасних приладів магнітоелектроніки.

2. Розглянути питання стосово магнітоелектронних інтегральних мікросхем (ІМС) та інших приладів спеціального функціонального призначення.

3. Навести результати вимірювань, розрахунків та висновки.

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

Слайди № 1-2. Мета і актуальність роботи.

Слайд № 3. Класифікація приладів магнітоелектроніки

Слайди №4-8. Фізика процесів та конструкція магніторезисторів, магнітодіодів, магнітотранзисторів та магнітотиристорів.

Слайд № 9-11. Магнітоелектронні інтегральні мікросхеми та прилади спеціального призначення.

Слайди №12. Висновки.

6. Дата видачі завдання 03.05.2022 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз літературних даних	до 02.05.2022 р.	<i>вик.</i>
2.	Проведення експерименту, моделювання, розрахунків, обробка результатів	до 12.05.2022 р.	<i>вик.</i>
4.	Оформлення тексту кваліфікаційної роботи.	до 17.05.2022 р.	<i>вик.</i>
5.	Попередній захист роботи	18.05.2022 р., онлайн	<i>вик.</i>
6.	Захист роботи в екзаменаційній комісії	24.05.2022 р., онлайн	<i>вик.</i>

Здобувач вищої освіти

Худякова Ю.О.

Науковий керівник

Однодворець Л.В.

РЕФЕРАТ

Мета кваліфікаційної роботи магістра полягає у вивченні фізичних принципів функціонування і конструктивно-технологічних особливостей магнітоелектронних приладів та дослідженні їх робочих характеристик.

У роботі розглянуті питання стосовно конструкції, технології виготовлення і галузей застосування магнітоелектронних приладів, принцип дії яких оснований на явищах електромагнетизму та магнітної індукції.

Показано, що широкі перспективи побудови функціональних приладів відкривають магнітні напівпровідники – магнетики, які не мають металевої природи електропровідності та являють собою з'єднання магнітних металів та слабомагнітних напівпровідників.

Вимірювання польових характеристик магнітоелектронної інтегральної мікросхеми А3144 показали, що при зростанні магнітного поля від 100 до 500 мТл вхідна напруга збільшується від 1,5 до 3,8 В ($U_{\text{вих}} = 8 \text{ В}$); від 2,5 до 6,5 В ($U_{\text{вих}} = 10 \text{ В}$) та від 4,2 до 10,8 ($U_{\text{вих}} = 16 \text{ В}$), що говорить, про можливість безконтактного керування електричним сигналом (вхідною напругою) за допомогою впливу магнітного поля та високу магнітну чутливість мікросхеми.

Робота викладена на 30 сторінках, зокрема, містить 11 рисунків, список використаних джерел із 20 найменувань.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: МАГНІТОЕЛЕКТРОНІКА, МАГНІТОРЕЗИСТОР, МАГНІТОДІОД, МАГНІТОТРАНЗИСТОР, МАГНІТОЕЛЕКТРОННА ІНТЕГРАЛЬНА МІКРОСХЕМА, ДАТЧИК ХОЛЛА.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. ПРИЛАДИ І ПРИСТРОЇ МАГНІТОЕЛЕКТРОНІКИ.....	7
1.1. Загальна характеристика магнітоелектронних приладів та фізичні процеси в них.....	7
1.2. Електричні властивості двокомпонентних магнітних напівпровідників з металевою провідністю.....	8
1.3. Магніторезистори.....	12
1.4. Магніодіоди.....	14
1.5. Магніотранзистори.....	15
1.6. Магніотиристоры.....	17
РОЗДІЛ 2. ПРИНЦИП ДІЇ ТА КОНСТРУКЦІЯ ІНТЕГРОВАНІХ МАГНІТОЕЛЕКТРОННИХ СХЕМ ТА ЇХ ЕЛЕМЕНТІВ.....	19
2.1. Магнітокомутуючі мікросхеми.....	19
2.2. Магнітоелектронні омметри.....	21
2.3. Перетворювачі Холла.....	22
2.4. Результати вимірювань.....	23
ВИСНОВКИ.....	26
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	27

ВСТУП

Магнітоелектронні прилади та системи широко використовуються в різних галузях промисловості, науки та технологій, наприклад, при дослідженні властивостей матеріалів мікро- і наноелектроніки, випробуванні магнітних елементів, при вимірюванні і контролі магнітних полів. Основними величинами, які характеризують магнітне поле, є магнітний потік, магнітна індукція і напруженість магнітного поля. Магнітні матеріали оцінюють за їх статичними і динамічними характеристиками, для чого магнітні величини спочатку перетворюються в електричні - більш зручні для вимірювання. На сучасному етапі розвитку функціональної електроніки та вимірювальної техніки широке застосування знаходять структури, в яких вихідною величиною є величина струму або напруги.

Досягнення мікроелектронних технологій в основному були реалізовані у засобах обробки інформації та комп'ютерної і сенсорної техніки. Мікрочастотні сенсори магнітного поля мають високу чутливість до вимірювальних параметрів, малу масу і габарити, інформаційну та конструктивну і технологічну сумісність із електронними засобами обробки інформації. Взагалі магнітоелектроніка – це галузь електроніки, яка присвячена теорії і практиці створення пристроїв, що ґрунтуються на явищах електромагнетизму та магнітної індукції, розвиток якої пов'язаний з появою нових магнітних матеріалів (магнітні напівпровідники) та впровадженням технологічних методів одержання тонких магнітних плівок, на основі яких будуть виконані елементи пам'яті ЕОМ, логічні мікросхеми і магнітні підсилювачі.

Мета кваліфікаційної роботи магістра полягала у вивченні фізичних принципів функціонування та конструктивно-технологічних особливостей магнітоелектронних приладів та дослідженні їх робочих характеристик.

Результати роботи були представлені та обговорені на Міжнародній науково-технічній конференції «Фізика, електроніка, електротехніка ФЕЕ-2022».

РОЗДІЛ 1

ПРИЛАДИ І ПРИСТРОЇ МАГНІТОЕЛЕКТРОНІКИ

1.1 Загальна характеристика магнітоелектронних приладів та фізичні процеси в них

Галузі функціональної електроніки - це галузі електроніки, які дозволяють реалізувати певну функцію апаратури без застосування базових елементів на основі фізичних явищ у твердих тілах [1-3]. У цьому випадку локальному об'єму твердого тіла надаються такі властивості, які потрібні йому для виконання певної функції. Функціональні мікросхеми можуть виконуватися на основі не тільки напівпровідників, а й таких матеріалів, як надпровідники, сегнетоелектрики, фотоматеріали та ін. Для перетворення інформації можна використовувати явища, які не пов'язані з електропровідністю (наприклад, оптичні та магнітні явища в діелектриках, поширення ультразвуку та ін.) [4-6].

Кількість матеріалів, у яких спостерігається магніторезистивний ефект, та варіанти їх використання на практиці досить різноманітні: це конструювання високочутливих головок для зчитування інформації з магнітних носіїв [7-9]. Багатошарові плівкові системи, мультишари та плівкові сплави на основі металів широко використовуються як надчутливі сенсори температури, чутливі датчики магнітного поля, зчитувальні головки, високочутливі магнітні реле та нанометрові комірки пам'яті [10].

Таким чином, формування і дослідження плівкових матеріалів із спин-залежним розсіюванням електронів у вигляді багатошарових плівок, мультишарів, гранульованих плівкових сплавів, спінових клапанів на основі металів і напівпровідників як чутливих елементів приладів різного функціонального призначення та інформаційних матеріалів з високою щільністю запису інформації є вигідним і перспективним напрямом мікро- і наноелектроніки.

1.2 Електричні властивості двокомпонентних магнітних напівпровідників з металевою провідністю

Останнім часом намітився значний прогрес у формуванні багат шарових магнітних плівок та штучно створених магнітних структур, в яких виникають нові фізичні ефекти. Тонкоплівкові магніторезистивні матеріали, в яких спостерігається магніторезистивний ефект широко застосовуються для формування перетворювальних елементів, на основі яких створюються накопичувачі інформації великої ємності, вимірювачі електричних струмів, магнітометри, діагностичні пристрої.

Для більш повного розуміння електричних процесів, які відбуваються в магнітних напівпровідниках розглянемо енергетичні діаграми двокомпонентних систем на основі феромагнітного металу і напівпровідника *n*-типу.

Як видно з рис. 1.1, енергетичні діаграми напівпровідника *n*-типу і металу, зорієнтовані відносно енергетичного рівня вільного електрона [11]. Розглянемо енергетичне положення електронів провідності в металі та напівпровіднику відносно положення вільних електронів. Оскільки електрони провідності взаємодіють з іонами кристалічних ґраток, енергія їх значно менша за енергію вільних електронів. Для того, щоб електрон з дна зони провідності став вільним, йому потрібно передати енергію, що дорівнює зовнішній роботі виходу, яка в свою чергу залежить від властивостей кристалічної ґратки і для матеріалів, що використовуються в магнітоелектроніці дорівнює 4-6 еВ [11, 12].

Для переміщення електрона з рівня Фермі у вакуум потрібно затратити термодинамічну роботу виходу $E_{\text{мет}}$ і $E_{\text{нпт}}$. Термодинамічна робота виходу для використовуваних металів, які є компонентами магнітних напівпровідників, дорівнює 4,2 – 4,8 еВ (для Fe – 4,71; Ni – 4,50; Co – 4,25). Недивлячись на те, висота потенціальних бар'єрів для електронів значна, деяка частина електронів провідності може вийти у вакуум [13]. У магнітному напівпровіднику на основі атомів феромагнітного металу і напівпровідника виникає електричне поле, вектор напруженості якого напрямлений від напівпровідника до металу.

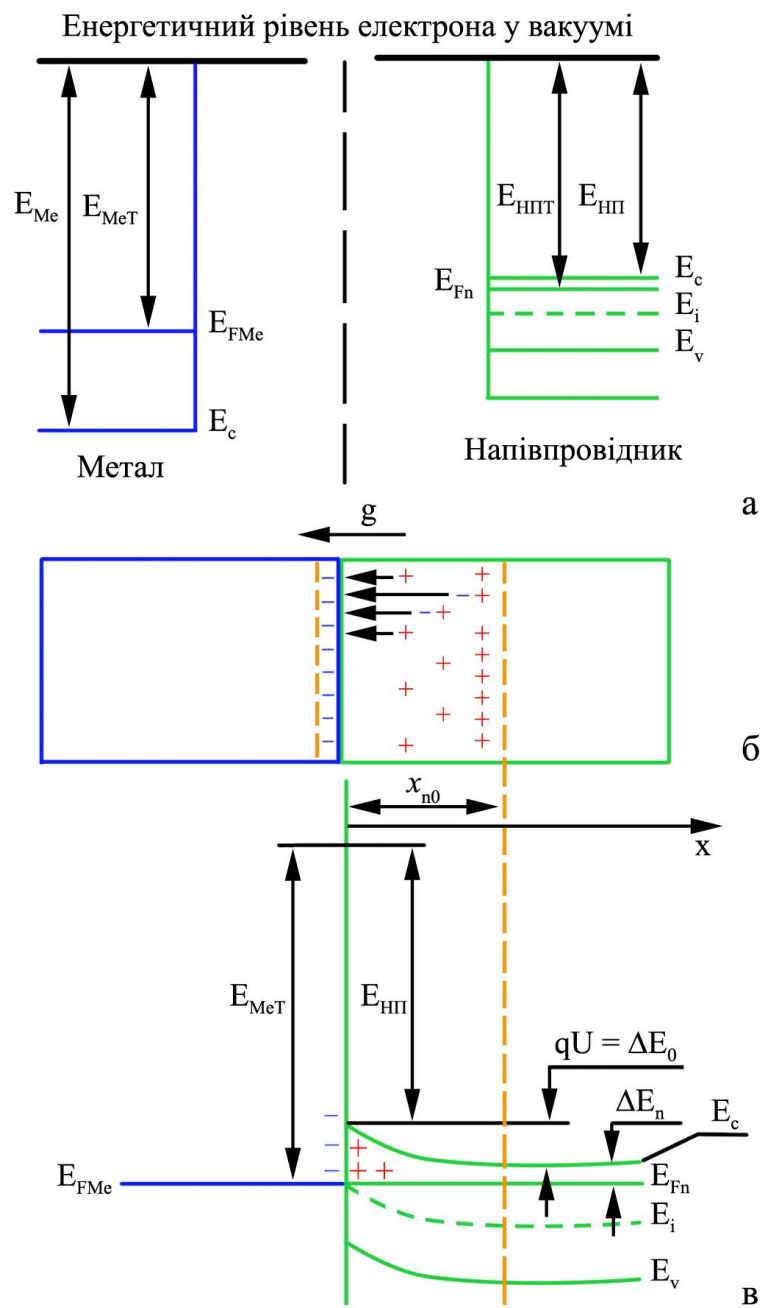


Рисунок 1.1 - Енергетичні діаграми металу та напівпровідника: метал і напівпровідник ізольовані (а); метал і напівпровідник у контакті (б, в). Адаптовано із роботи [1]

Електричне поле майже не проникає в метал, а локалізується в приповерхневому шарі напівпровідника, товщину x_n якого розраховують так само, як для p - n -переходу. Шар збіднюється основними носіями заряду (електронами), а просторовий заряд у ньому створюється позитивно іонізованими донорними атомами. Електричне поле в переході накладається на поле атомів у ґратці, але воно значно менше, ніж останнє, і не може змінити структуру енергетичних зон, а лише викривлює їх [1, 6, 13].

Відбувається зміщення рівня Фермі пов'язане зі зменшенням концентрації електронів у приповерхневому шарі напівпровідника і відповідним зростанням потенціального бар'єра для електронів: від $\Delta E(x) = 0$ при $x = x_{n0}$ до $\Delta E(x) = \Delta E_0$ при $x = 0$. Розподіл електронів у приповерхневому шарі напівпровідника визначається за формулою:

$$n(x) = n_0 \exp\left[-\frac{\Delta E(x)}{kT}\right] = N_D \exp\left[-\frac{U(x)}{U_T}\right],$$

де $U(x) = \Delta E(x)/q$, $U_T = kT/q$.

Залежно від полярності прикладеної напруги висота потенціального бар'єра і концентрація носіїв у приповерхневому шарі збільшиться або зменшиться $U' = U_0 \pm U$. Якщо зовнішню напругу U ввімкнути у прямому напрямі, то вона послаблятиме електричне поле контакту і зменшуватиме висоту потенціального бар'єра: $U' = U_0 - U$. Якщо зовнішню напругу U ввімкнути у зворотному напрямі, висота потенціального бар'єра зросте: $U' = U_0 + U$. Зросте товщина і збільшиться опір ОПЗ. Через контакт проходитиме лише зворотний струм термічно збуджених електронів металу в прискорювальному полі контактного шару [1].

Електронний струм в магнітному напівпровіднику можемо розрахувати за співвідношенням (3.1), якщо замість термодинамічної роботи виходу підставимо висоту потенціального бар'єра:

$$j_{MH} = \frac{m_n^*(kT)^2}{2\pi h^3} \exp\left(-\frac{U_{MH}}{U_T}\right), \quad (1.1)$$

де m_n - ефективна маса електрона.

Потік електронів за нерівноважних умов із напівпровідника в метал визначають за формулою (1.2) з урахуванням зовнішнього зміщення. Якщо напруга зовнішнього зміщення U підведена до контакту в прямому напрямі, то висота потенціального бар'єра знизиться ($U_{MH} - U$) і потік електронів з напівпровідника стане набагато більшим [1, 14]:

$$j_{HM} = \frac{m_n^*(kT)^2}{2\pi h^3} \exp\left(-\frac{U_{MH} - U}{U_T}\right). \quad (1.3)$$

Підставивши в рівняння (1.3) вираз (1.2) отримаємо:

$$j_{HM} = q \frac{m_n^*(kT)^2}{2\pi h^3} \exp\left(-\frac{U_{MH}}{U_T}\right) \left[\exp\left(\frac{U}{U_T}\right) - 1 \right], \quad (1.4)$$

Вираз $A^* = q \frac{m_n^* k^2}{2\pi h}$ називається сталою Річардсона.

Тоді рівняння (1.4) матиме такий вигляд:

$$j_{HM} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{U_{MH}}{U_T}\right) \left[\exp\left(\frac{U}{U_T}\right) - 1 \right], \quad (1.5)$$

Отримане співвідношення є рівнянням вольт-амперної характеристики магнітодіода. За прямого зміщення $U \gg U_T$, тому $\exp(U/U_T) \gg 1$ і одиницею в рівнянні (1.5) можна знехтувати. За зворотного зміщення U буде від'ємною величиною і в (3.5) $\exp(-U/U_T) = 0$. Через діод проходитиме струм насичення діода.

1.3 Магніторезистори

Магніторезистори – це електронні компоненти, дія яких заснована на зміні електричного опору напівпровідника (або металу) при впливі на нього магнітного поля. Зміна електричного опору під дією поперечного магнітного поля називають магніторезистивним ефектом [15, 16].

Магнітоопір – властивість матеріалу змінювати свій електричний опір у полі. Ця відносна зміна опору не залежить від напрямку прикладеного магнітного поля, а, отже, є парною функцією магнітної індукції B .

Основними параметрами магніторезисторів є: номінальний опір за відсутності магнітного поля, температурний коефіцієнт опору, максимально припустима потужність розсіювання.

Конструктивно магніторезистори – це підкладка з розміщеним на ній магніточутливим елементом (МЧЕ). Підкладка забезпечує механічну міцність приладу, а елемент приклеєний до підкладки і захищений зовні шаром лаку. МЧЕ може розміщуватися в оригінальному або стандартному корпусі і забезпечуватися феритовим концентратором магнітного поля або «зміщується» постійним мікромагнітом (Рис.1.2). «Монолітні» МЧЕ виготовляються з напівпровідникових матеріалів з високою рухливістю носіїв заряду. До таких матеріалів відносяться антимонід індію ($InSb$) і арсенід індію ($InAs$).

Магніторезистори застосовуються як чутливі елементи сенсорної електроніки: швидкості і напрямку обертання, кута повороту і положення, лінійного переміщення, витрати рідини і газу, електричного струму та напруги, в безконтактній клавіатурі ЕОМ, безконтактних змінних резисторах, модуляторах і перетворювачах, електронних навігаторах, в побутовій електронній апаратурі, системах автоматичного управління, електронних іграшках [5, 7].

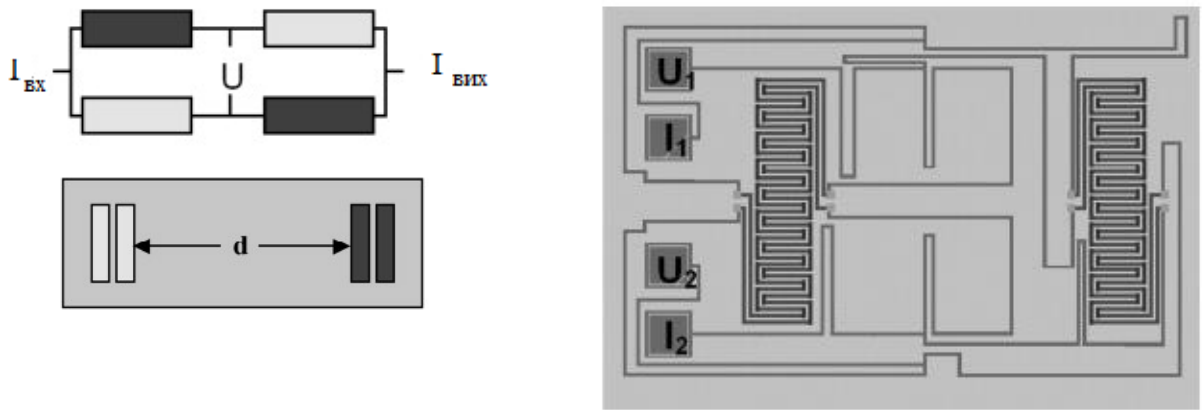


Рисунок 1.2 – Схема для пояснення принципу роботи магнітрезистора (а) та його конфігурація в схемі мосту Уїтстона (б). Адаптовано із робіт [2, 3]

Конструкція напівпровідникового магнітрезистора повинна бути такою, щоб ЕРС Холла була мінімальною. Найефективнішою формою є диск Корбіно [7], коли без магнітного поля струм йде в радіальному напрямку. Під впливом магнітного поля носії відхиляються в напрямку, перпендикулярному радіусу, оскільки граней немає, то немає і ЕРС Холла. Інша конструкція – пластина, ширина якої набагато більша за довжину. Недоліком такої конструкції є малий опір, тому з'єднують кілька магнітрезисторів на основі InSb і InAs послідовно. Виключити ефект Холла можна нанесенням вузьких металічних смужок для закорочування холлівської ЕРС. Вони повинні бути розташовані перпендикулярно лініям струму та напрямку магнітного поля. Замість тонких смужок можуть використовуватися монокристали з впровадженими металевими нитками. Цей варіант реалізується при створенні магнітрезисторів з евтектичного сплаву InSb-NiSb, в якому NiSb випадає у вигляді голок високої провідності. Інший спосіб виключення ефекту Холла реалізується на основі мікроелектронної технології і полягає у формуванні магнітрезисторів на основі кремнієвих епітаксійних плівок, що містять низькоомні шунтуючі ділянки полікремнію, розташовані перпендикулярно напрямку струму.

Феромагнітні матеріали змінюють свій опір в магнітному полі (залежно від величини магнітної індукції та кута між напрямками векторів магнітної індукції B і струму). Для виготовлення датчика магнітного поля [15 - 17] створюються

два резистори за тонкоплівковою технологією у формі меандрів, при цьому один розташовується в напрямку вектора, а інший - перпендикулярно йому. У магнітному полі в резисторі, розташованому паралельно, спостерігається впорядкування магнітних моментів, його опір зменшується в порівнянні з опором резистора, розташованого перпендикулярно B . Обидва резистора включаються в мостову схему в суміжні плечі. Матеріал резисторів – пермалою (80 % Ni + 20 % Fe). Опір резисторів від 30 до 1000 Ом. Перспективним напрямком у розвитку сенсорної електроніки є розробка датчиків для медицини, коли біосенсори дозволяють контролювати стан організму людини при хронічних захворюваннях, допомагають у виборі видів лікування.

1.4 Магніодіоди

Магніодіоди – це напівпровідникові діоди з р-п – переходом, в яких вольт-амперна характеристика змінюється під дією магнітного поля. Конструктивно магніодіод являє собою р-п-перехід з не випрямляючим омичним контактом, між якими знаходиться область високоомного напівпровідника (Рис.1.3).

Магніодіоди – це напівпровідникові діоди, у яких вольт - амперна характеристика змінюється під дією магнітного поля. У звичайних напівпровідникових діодів тонка база та магнітне поле трохи змінює вольт – амперну характеристику [4, 18]. А магніодіоди мають «довгу» базу (Рис.1.3), в якій довжина шляху струму набагато більша за дифузійну довжину інжектованих в базу носіїв. Зазвичай товщина бази становить кілька міліметрів. У цьому випадку опір бази можна порівняти з прямим опором р-п переходу. При збільшенні індукції поперечного магнітного поля опір бази значно зростає. Зростає загальний опір діода, і прямий струм зменшується. Таке зменшення струму пов'язане ще й з тим, що при зростанні опору бази відбувається перерозподіл напруги.

Виготовляють магніодіди на основі напівпровідників з можливо більшою рухливістю носіїв. Часто магніодіди роблять зі структурою $p - i - n$, причому подовжена область i має значний опір і саме в ній виникає різко виражений магніторезистивний ефект. Чутливість до зміни магнітної індукції у магніодіодів вище, ніж у перетворювачів Холла. Такий магніодіодний ефект візуалізується за допомогою вольт-амперних характеристик. Зазначимо, що для магніодіодів характерна значно більша пряма напруга, ніж для звичайних діодів, що пояснюється великим опором бази [4, 18].

Основним параметром магніодіода є його магнітна чутливість. Магніодіоди широко застосовуються: у безконтактних кнопках і клавішах для введення інформації; як датчики визначення положення предметів, які рухаються, для зчитування магнітного запису інформації; для вимірювання і контролю неелектричних величин. На основі магніодіодів конструюють безконтактні реле струму та магніодіодні підсилювачі.

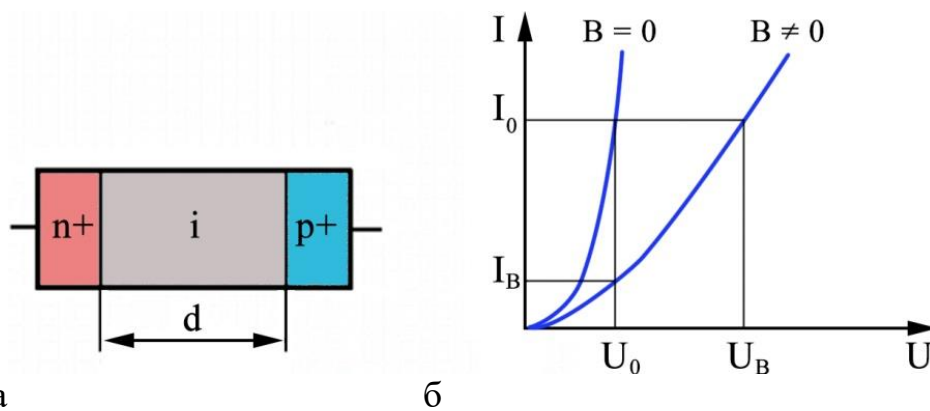


Рисунок 1.3 – Конструкція (а) і вольт-амперна характеристика (б) магніодіода. Адаптовано із роботи [4]

1.5 Магніотранзистори

Магніотранзистори – це транзистори, в яких вихідний струм визначається магнітним потоком, що проходить через нього, а інші характеристики та параметри змінюються під впливом магнітного поля. Їх вихідний струм

чутливий і до світлового потоку, тому створюється можливість подвійного безконтактного керування вихідним сигналом – магнітним потоком та світлом.

Магнітотранзистори класифікують на чотири типи: одноперехідні (ОПТ), одноколекторні (ОКТ), двоколекторні (ДМТ) [4-6, 19].

Одноперехідні – магнітотранзистори, що діють на основі модуляції опору бази носіїв заряду, які інжектуються із емітера та мають S-подібну вхідну характеристику (Рис.1.4). Характер кривої 1 вказує на те, що чим більше час життя інжектованих носіїв в базі, тим глибше вони проникають в неї, і тим менше значення має залишкова напруга U_0 . Якщо транзистор помістити у магнітне поле на інжектовані носії починає діяти сила Лоренца, яка відхиляє їх до стінок бази або навпаки (в залежності від напрямку магнітного поля). Оскільки швидкість рекомбінації носіїв біля стінок бази значно більша, ніж в її об'ємі, це призведе до зміни час життя інжектованих носіїв і, відповідно, U_0 . Магнітна чутливість для ОПТ складає величину $2 \cdot 10^3$ В/АТл.

Одноколекторні – вертикальні біполярні транзистори (області емітера, бази та колектора розташовані один за одним в напрямку від поверхні в глибину напівпровідника), в яких під дією магнітного поля відбувається викривлення траєкторії носіїв заряду емітера, що приводить до збільшення ефективної довжини бази та відхиленню частини носіїв від колектора (Рис.1.5) [9, 19]. Збільшення γ таких транзисторів відбувається за рахунок зменшення ширини колектора. Реальні розміри колектора та емітера однакові $(0,6 \times 0,6)$ мм², відстань між ними $l = 0,8$ мм. Найбільша магніточутливість досягається при включенні ОКТ як двохполюсника при вимкнутій базі. В такому випадку при струмі $I_{e-k} = 0,6$ мА магніточутливість $\gamma = 2 \cdot 10^4$ В/АТл.

Двоколекторні магнітотранзистори – біполярні транзистори, в яких колектори K_1 і K_2 розміщуються симетрично відносно емітера. За відсутності магнітного поля струм емітера поділяють на дві рівні частини, які потрапляють на колектори. Якщо на транзистор почне діяти поперечне магнітне поле, то під впливом сили Лоренца електрони колекторного струму будуть відхилятися. На

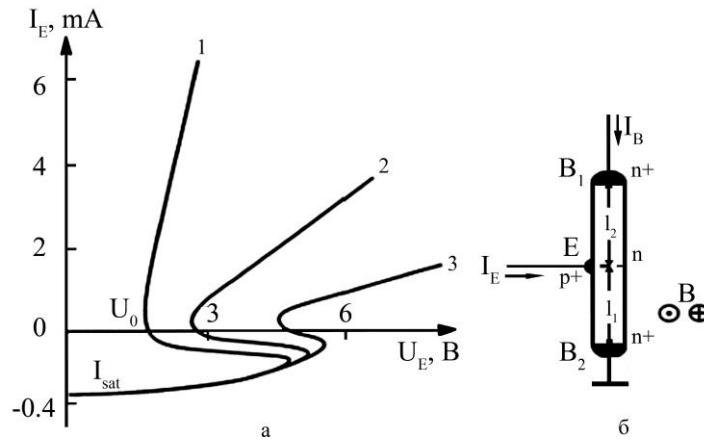


Рисунок 1.4 – Вхідна характеристика ОПТ: крива 1 – $B = 0$; крива 2 – $B = 0,3$ Тл; крива 3 – $B = 0,6$ Тл. Адаптовано із роботи [4]

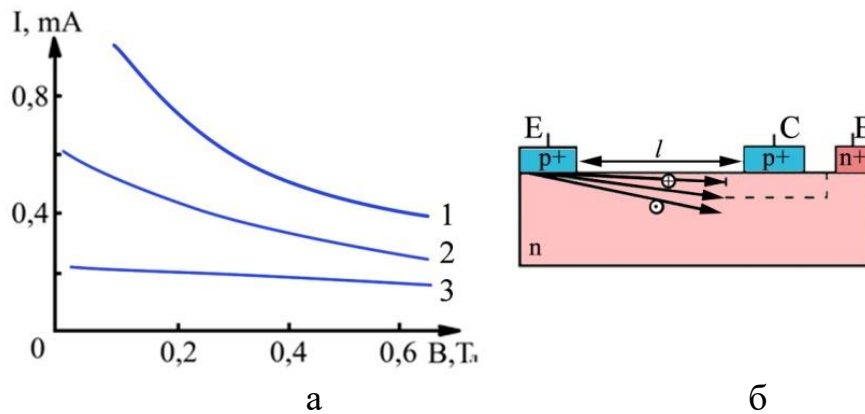


Рисунок 1.5 – Вхідна характеристика (а) та схематичне зображення руху носіїв заряду (б) в одноколекторному магнітотранзисторі: крива 1 – 25 В; крива 2 – 20 В, крива 3 – 15 В. Адаптовано із роботи [4]

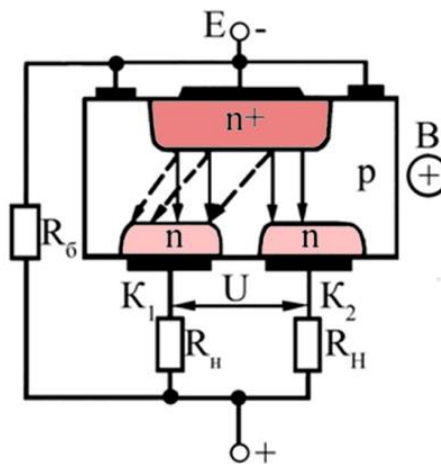


Рисунок 1.6 – Схема двоколекторного магнітотранзистора. Адаптовано із робіт [4, 5]

колектор K_1 потрапить більше електронів, і його струм збільшиться, а струм колектора K_2 відповідно зменшиться. Потенціали колекторів стануть різними. Вихідна напруга між колекторами збільшиться $U \neq 0$ зі збільшенням магнітної індукції B .

Польові магнітотранзистори застосовуються у безконтактних вимірювачах сили сильних постійних струмів та електричної потужності; вимірювання неелектричних величин (тиск, переміщення, кут) та рухливості і концентрації носіїв заряду в напівпровідниках.

1.6 Магнітотиристри

Магнітотиристри – це напівпровідникові тристри типу $p-n-p-n$, в яких, в яких напругу ввімкнення можна змінювати, впливаючи зовнішнім магнітним полем. За відсутності магнітного поля магнітотиристри мають деяку середню напругу ввімкнення.

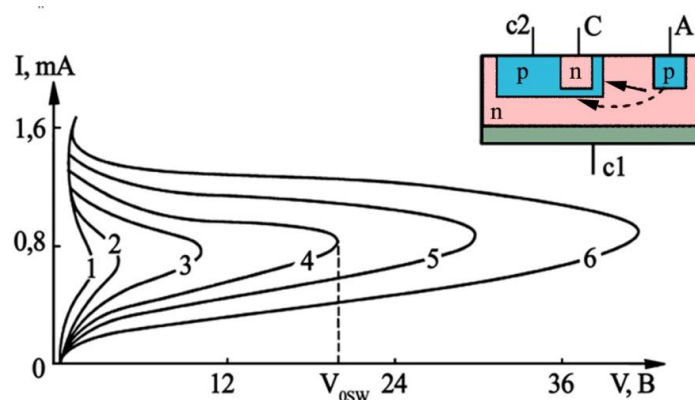


Рисунок 1.7 – ВАХ Si- магнітотиристора, відстань між p -областями 100 мкм: 1 – $B = -1$ Тл; 2 – $B = -0,8$ Тл; 3 – $B = -0,4$ Тл; 4 – $B = 0$; 5 – $B = 0,4$ Тл; 6 – $B = 0,8$ Тл. А – анод; $c1$ і $c2$ – керувальні електроди

При зростанні напруженості магнітного поля в одному напрямку напруга ввімкнення зростає, а в протилежному напрямку – зменшується, тобто змінюється вольт-амперна характеристика магнітотиристора (Рис.1.7)

РОЗДІЛ 2

ПРИНЦИП ДІЇ ТА КОНСТРУКЦІЯ ІНТЕГРОВАНИХ МАГНІТОЕЛЕКТРОННИХ СХЕМ ТА ЇХ ЕЛЕМЕНТІВ

2.1 Магнітокомутуючі мікросхеми

Магніточутливі елементи використовуються в приладах двох типів:

- у вимірвальних пристроях, де вихідний сигнал є функцією магнітної індукції;
- в перемикальних пристроях, де вихідний сигнал змінюється від логічного нуля до логічної одиниці.

Такі прилади конструюються у вигляді інтегрованої мікросхеми (ІМС), яка працює в звичайному інтервалі температур. Одним із методів забезпечення її температурної стабільності є метод, розглянутий на прикладі мікросхеми, вхідна частина якої приведена на рисунку 1.8. Схема містить диференціальний підсилювач на транзисторах (ДМТ), і струмозадаючий транзистор СТ. Вихідна напруга ДМТ із зростанням температури зменшується, що при використанні простого підсилювача приводить і до зменшення його вихідного сигналу.

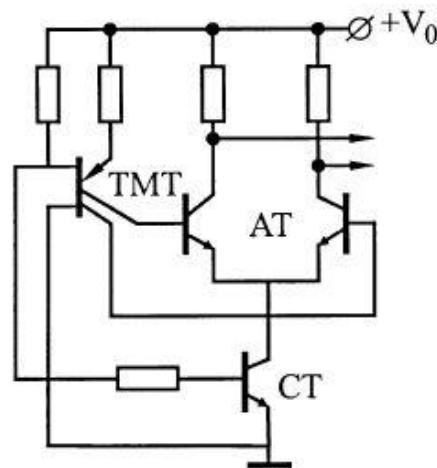


Рисунок 2.1 – Схема вхідної частини мікросхеми з двохколекторним магнітотранзистором: ТМТ на схемі (two - collector magnetotransistor) - двохколекторний магнітотранзистор (у тексті ДМТ) АТ – диференціальний підсилювач на двох транзисторах, СТ – струмозадаючий транзистор

Величина ЕРС Холла в МДП транзисторі і в польовому транзисторі з р–п-переходом практично однакові при рівних розмірах і електрофізичних параметрах каналу. Опори каналів разом з резисторами навантажень утворюють міст, в діагональ якого включений вольтметр. При відсутності магнітного поля міст збалансований, під дією магнітного поля в ньому виникає ЕДС Холла.

Одна частина ЕДС ($-V_H / 2$) прикладена до лівого каналу замикає його, а друга ($+V_H / 2$) - знімається з базового ланцюга ДМТ. Із зростанням температури опір кремнієвого резистора збільшується (внаслідок зменшення рухливості носіїв), що призводить до збільшення падіння напруги на нім, яка подається на вхід СТ. Це збільшує струм живлення СТ і АТ із зростанням температури. Збільшення струму живлення через будь-який біполярний транзистор (при малих струмах) призводить до зростання його коефіцієнта підсилення. Таким чином, вихідний сигнал підсилювача не залежить від температури, а визначається тільки величиною індукції магнітного поля, що дозволяє практично повністю компенсувати температурну нестабільність вихідного сигналу.

Широке застосування отримали ІМС, в яких транзистори мають суміщені області, через які сигнали передаються шляхом безпосереднього перенесення інжектованих носіїв з одного транзистора в інший. Для збільшення магніточутливості можливе з'єднання декількох магніточутливих елементів в одній ІМС.

2.2 Магнітоелектронні омметри

Існують дві схеми електронних омметрів: одна – з послідовним вмиканням вимірюваного опору R_x та вимірювального механізму (ВМ), інша – з паралельним (Рис.2.2). Для омметра з послідовною схемою струм через вимірювальний механізм (при ненависнутій кнопці K_H) дорівнює:

$$I = \frac{E}{R_M + R_x + R_D},$$

$$\text{відхилення рухомої частини } \alpha = S_1 \cdot I = \frac{S_1 \cdot E}{R_M + R_X + R_D}.$$

Відхилення α є функцією R_x , воно максимальне при $R_x = 0$, тобто нуль знаходиться на шкалі приладу справа.

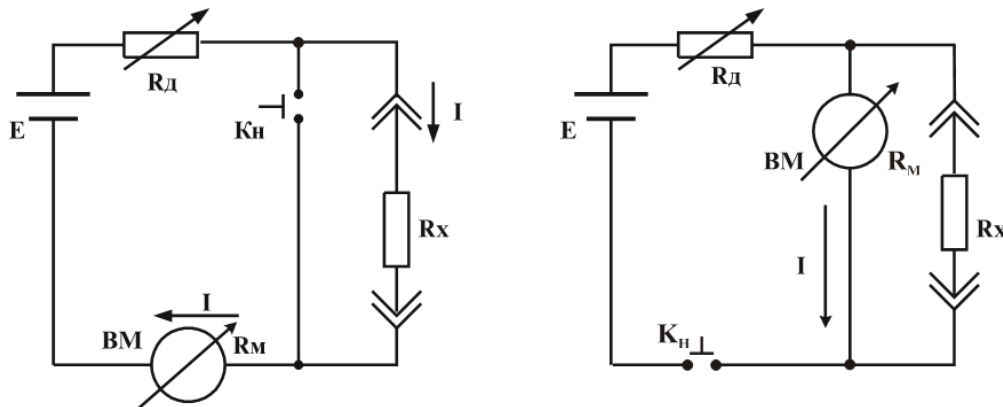


Рисунок 2.2 – Принципові схеми магнітоелектронних омметрів з послідовним (а) та паралельним (б) вмиканням

Такі омметри виготовляються переносними із живленням від сухих елементів. У процесі експлуатації напруга на затискачах сухих елементів змінюється і може відрізнятись від тієї, яка була при градуюванні приладу. Тому перед кожним вимірюванням в омметрі з послідовною схемою при натиснутій кнопці K_n потрібно встановлювати нуль зміною опору R_d , а в омметрі з паралельною схемою потрібно встановити нуль при невідключеному R_x . Це є недоліком таких омметрів. Цього недоліку не мають омметри, які використовують механізм-логометр (Рис.2.2).

2.3 Перетворювачі Холла

Зважаючи на те, що холловська напруга обернено пропорційна концентрації носіїв заряду, матеріалами для виготовлення датчиків Холла є напівпровідники. Перетворювачі Холла можуть бути виготовлені у вигляді пластинок прямокутної форми, вирізаних з монокристалічного напівпровідника (Si, Ge, GaAs, InAs) або з полікристалу, і у вигляді тонких плівок (HgSe, HgTe

та їх твердих розчинів, InSb, GaAs, InAs) товщиною 1 – 10 мкм. У зв'язку з тим, що холловське напруження обернено пропорційно товщині зразка, використання тонких плівок підвищує ефективність датчиків Холла.

На даний час для виготовлення тонких плівок використовується технологія епітаксійного нарощування на напівізолюючих підкладках. Зазвичай використовуються напівпровідники n-типу, так як $\mu_n > \mu_p$. Перспективні широкозонні матеріали з високою рухливістю носіїв заряду, так як широка заборонена зона забезпечує менше концентрації власних носіїв і дає можливість використовувати матеріали з меншою концентрацією домішки, зменшується температурна залежність ЕРС Холла і зростає верхня межа робочих температур. До пластин або плівок виготовляються чотири омичні контакти. Промисловістю випускаються перетворювачі Холла з Ge, Si та GaAs.

Для вимірювання магнітних полів при низьких температурах використовуються вузькозонні напівпровідники, наприклад, InSb має максимальне значення $\mu_n = 7,8 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, ширину забороненої зони 0,1 еВ. Тонкі плівки InSb епітаксійно нарощують на напівізолюючих підкладках з GaAs. Товщина плівки становить 2 – 9 мкм. Такі датчики використовуються для вимірювання магнітних полів до 14 Тл при температурах 4,2 – 350 К.

З розвитком технології епітаксійного вирощування тонких досконалих плівок напівпровідників з'явилися умови для виготовлення високочутливих та стабільних датчиків Холла на основі епітаксіальних плівок GaAs. Поєднання таких факторів, як велика ширина забороненої зони (1,43 еВ), високе значення коефіцієнта Холла та рухливості електронів ($0,95 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$), можливість автоепітаксіального вирощування плівок на напівізолюючих підкладках зумовили використання цього матеріалу.

Зі зменшенням товщини плівки до 1 мкм магніточутливість зростає, потім зростання припиняється внаслідок падіння рухливості носіїв через розсіювання на дефектах поверхні. Магніточутливість датчиків Холла складає: 35 В/А·Тл (Ge), 90 В/А·Тл (Si), 100-1000 В/А·Тл (GaAs).

Час релаксації процесів, що визначають ефект Холла, $10^{-12} - 10^{-13}$ с, звідси впливає теоретична частотна межа, на практиці такі високі частоти не використовуються внаслідок таких труднощів. На частотах більше 10 МГц змінного струму $V = \text{const}$ може позначатися нелінійність контактів. У змінному магнітному полі при $I = \text{const}$ індуються вихрові струми у напівпровіднику та зростає його нагрівання. Тому у високочастотному магнітному полі слід зменшувати робочий струм. У зв'язку з тим, що ЕРС Холла пропорційна добутку величини струму і магнітної індукції, перетворювачі Холла використовуються для вимірювання магнітних полів; фізичних величин, що перетворюються на магнітну індукцію; струмів (при $V = \text{const}$); у датчиках переміщення та положення (використовується зсув магніту щодо датчика); у датчиках тиску (постійний магніт встановлюється на мембрані та зміщується по відношенню до датчика).

2.4 Результати вимірювань

З використанням віртуального середовища NI Multisim 14 отримані польові залежності для вхідної напруги магнітоелектронної інтегральної мікросхеми – модуля датчика Холла А3144, який застосовується для визначення факту наближення магніту до датчика і визначення полюса магніту, як тахометр, датчик відчинення дверей, датчик положення вала при управлінні безколекторним двигуном або як датчик рівня води [20]. Вихідним результатом роботи ІМС А3144 є аналоговий сигнал, також пристрій має цифровий інтерфейс і встановлений LED-індикатор. У разі відсутності магнітного поля датчик видає половину напруги живлення. При появі магнітного поля значення відхиляється до нуля або напруги живлення залежно від полярності магнітного поля і пропорційно до його інтенсивності. Технічні характеристики: робоча напруга 4.5-24 В; цифровий вихід; індикація LED. Зауважимо, що в середовищі NI Multisim по замовчуванню робоча температура для всіх елементів становить 27 °С. Щоб задати 20 °С необхідно в меню Simulate робочого вікна обрати

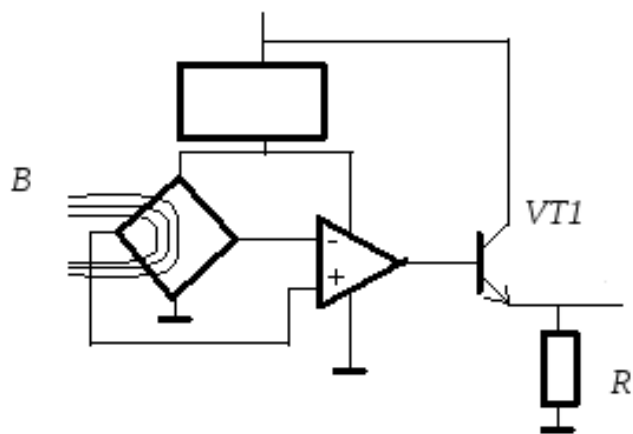


Рисунок 2.3 – Принципова схема для вимірювання робочих характеристик магнітоелектронної ІМС А3144

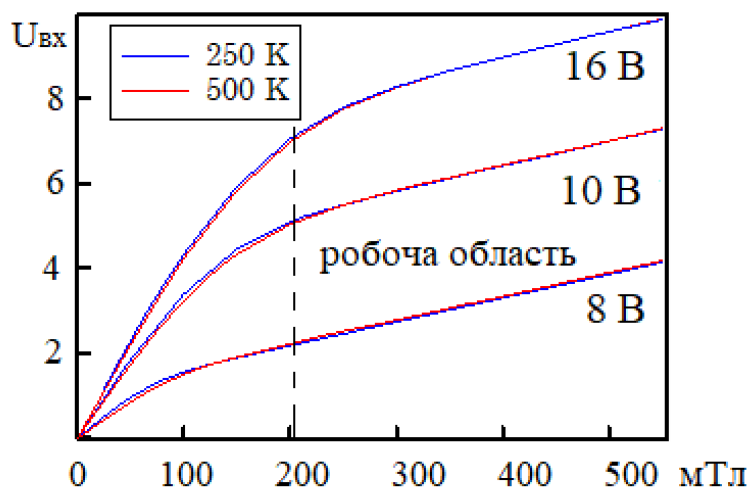


Рисунок 2.4 – Польові залежності вхідної напруги мікросхеми А3144

пункт *Analyses and Simulation*, де на вкладці налаштування симуляції обрати вкладку *Analysis options* та задати параметр *SPICE options* як *Use custom settings*. Після цього натиснути кнопку *Customize*, знайти параметр *TEMP* та присвоїти йому значення 20, після чого закриваємо вікно кнопкою *OK* та зберігаємо зміни налаштувань симуляції кнопкою *Save*.

Отримані польові залежності вхідної напруги наведені на рис.2.4. Результати вимірювань вказують на те, що в магнітоелектронній інтегральній мікросхеми А3144 при зростанні магнітного поля від 100 до 500 мТл вхідна напруга збільшується від 1,5 до 3,8 В ($U_{\text{вих}} = 8 \text{ В}$); від 2,5 до 6,5 В ($U_{\text{вих}} = 10 \text{ В}$) та від 4,2 до 10,8 ($U_{\text{вих}} = 16 \text{ В}$), що говорить, про можливість безконтактного керування вхідною напругою під впливом магнітного поля.

ВИСНОВКИ

У роботі розглянуті питання стосовно конструктивно-технологічних особливостей, робочих параметрів і характеристик та галузей застосування приладів магнітоелектроніки та фізичних процесів в них.

1. Вивчена класифікація магнітоелектронних приладів, принцип дії яких оснований на явищах електромагнетизму та магнітної індукції (намагнічування, перемагнічування, розмагнічування осердь імпульсним або безперервним струмом, виникнення ЕРС в провіднику, який рухається, під дією магнітного поля). Розрізнять декілька груп сучасних магнітних елементів: перетворювачі Холла; магніторезистори; магнітодіоди; магнітотранзистори, магніотиристри та магнітоелектронні інтегральні мікросхеми.

2. Показано, що широкі перспективи побудови функціональних приладів відкривають магнітні напівпровідники – магнетики, які являють собою з'єднання магнітних металів та слабомагнітних напівпровідників.

3. Установлено, що перевагами приладів магнітоелектричної системи є високий клас точності (до 0,1) і порівняно малі внутрішні втрати енергії. Недоліком приладів цієї системи можна вважати непридатність до роботи в полях змінного струму, чутливість до перевантажень і залежність від температури навколишнього середовища.

4. Вимірювання польових характеристик магнітоелектронної інтегральної мікросхеми А3144 показали, що при зростанні магнітного поля від 100 до 500 мТл вхідна напруга збільшується від 1,5 до 3,8 В ($U_{\text{вих}} = 8 \text{ В}$); від 2,5 до 6,5 В ($U_{\text{вих}} = 10 \text{ В}$) та від 4,2 до 10,8 ($U_{\text{вих}} = 16 \text{ В}$), що говорить, про можливість безконтактного керування електричним сигналом магнітним полем та високу магнітну чутливість мікросхеми.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Прищепя М.М., Погребняк В.П. Мікроелектроніка. Частина І. Елементи електроніки. – Київ: Вища школа, 2004. – 431 с.
2. Сенько В.І., Панасенко М.В., Сенько Є.В. Електроніка і мікросхемотехніка. – Т.1. Елементна база електронних пристроїв. – Київ: Обереги, 2000. – 300 с.
3. Стахів П.Г., Коруд В.І., Гамола О.Є. Основи електроніки: функціональні елементи та їх застосування. - Львів: Новий світ-2000, 2003. – 128 с.
4. Матеріали і компоненти функціональної електроніки: навчальний посібник (електронне видання) / Л.В. Однорець, І.М. Пазуха. – Суми: Сумський державний університет, 2020. – 196 с.
5. Матвійків М.Д., Когут В.М., Матвійків О.В. Елементна база електронних апаратів - Львів: Вид-во НТУ «Львівська політехніка», 2007. – 428 с.
6. Гуржій А.М., Поворознюк Н.І. Електричні і радіотехнічні вимірювання. – 2002. – Київ: Навчальна книга. – 288 с.
7. Мікроелектронні сенсори магнітного поля з частотним виходом : монографія / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 264 с.
8. Development of magnetoresistive sensors based on planar Hall effect for applications to microcompass / F. Montaigne, A. Schuhl, F. Nguyen Van Dau // Sensor Actuat. A-Phys. – 2000. – V. 81. – P. 324.
9. Ogrin F.G., Lee S.L. , Ogrin Y.F. Investigation of perpendicular anisotropy of a thin film using the planar Hall effect // J. Magn. Magn. Mater.– 2000.–V. 219.– P. 331.
10. Трунов О. М. Датчики та сенсори робототехнічних систем. – 2020. – Миколаїв: ЧНУ. – 39 с.
11. Yazhou Zhou, Priscila F. S. Rosa, Jing Guo, Shu Cai, Rong Yu, Sheng Jiang, Ke Yang, Aiguo Li, Qimiao Si, Qi Wu, Zachary Fisk, and Liling Sun, Hall-coefficient diagnostics of the surface state in pressurized SmB_6 // Phys. Rev. B. – 2020. – V.101. – P. 125116.

12. Sensor and microelectronic elements based on nanoscale granular systems (review) / S.A.Nepijko, D. Kutnyakhov, L.V. Odnodvoretz, S.I. Protsenko, G.J. Schonhense // J. Nanopart. Res. – 2011. – V.12 (13). – P.6263 – 6281.

13. Бондаренко І.М., Бородін О.В., Карнаушенко В.П., Васильєв Ю.С. Прилади та пристрої інтегральної електроніки. Частина 1: навч. посібник для студентів ЗВО. – Харків: ХНУРЕ, 2020. – 228 с.

14. Матвієнко М.П. Основи електроніки: підручник. – Київ: Видавництво Ліра-К, 2017. – 364 с.

15. Матвійків М.Д., Когут В.М., Матвійків О.В. Елементна база електронних апаратів. – Львів: Вид-во НТУ «Львівська політехніка», 2018. – 428 с.

16. Крилик Л.В., Селецька О.О. Матеріали електронної техніки: навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2017. – 120 с.

17. Технологія одержання і фізичні властивості плівкових матеріалів та основи мікроелектроніки (практикуми): навч. посіб. / І.Ю. Проценко, Л.В. Оdnodvoretz. – Електронне видання каф. електроніки, загальної та прикладної фізики. – Суми: СумДУ, 2020. – 231 с.

18. Магнетики в електроніці: Курс лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Ю. М. Поплавко, О. В. Борисов, І. П. Голубєва, Ю. В. Діденко. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 365 с.

19. Мустецов Т.М. Функціональна електроніка: навчальний посібник. – Харків : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2018. – 164 с.

20. Худякова Ю.О., Лободюк О.С., Толстіков Д.І., Оdnodvoretz Л.В. Перетворювачі Холла: фізичні процеси та робочі характеристики / Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції студентів і молодих вчених «Фізика, електроніка, електротехніка ФEE-2022». – Суми: Сумський державний університет. – С.50.