

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

Кафедра електроніки, загальної та
прикладної фізики

Кваліфікаційна робота магістра
**ЕФЕКТ ХОЛЛА В ПЛІВКОВИХ МАТЕРІАЛАХ
СЕНСОРНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ**

Виконав
студент гр.ЕП.м-91н



Д.І. Толстіков

Науковий керівник,
д.ф.-м.н., професор



Л.В. Одноворець

Завідувач кафедри електроніки,
загальної та прикладної фізики,
д.ф.-м.н., професор



І.Ю.Проценко

Суми 2021

РЕФЕРАТ

Об'єктом дослідження кваліфікаційної роботи: ефект Холла в плівкових матеріалах сенсорної електроніки на основі металів та напівпровідників.

Мета роботи полягала у вивченні фізичних принципів функціонування датчиків Холла та вимірювання сталої Холла (СХ) в двошарових плівкових матеріалах на основі металів і напівпровідників.

Установлено, що залежність величини напруги Холла від індукції магнітного поля носить лінійний характер, що дозволяє застосовувати такі плівки для конструювання датчиків магнітного поля, і має величину: 55-65 мВ (одношарові плівки Fe(20-30); 90-120 мВ (двокомпонентні плівки Fe(30)/Ge(30)/П, відпалені до $T = 450$ К) та 80-130 мВ (двокомпонентні плівки Fe(30)/Ge(30)/П, відпалені до $T = 570$ К), що говорить про можливість застосування таких плівок як чутливих елементів датчиків магнітного поля.

Експериментально встановлено, що величина сталої Холла для одношарових плівок Fe і Ge складає $(1 - 10) \cdot 10^{-10}$ і $(2 - 5) \cdot 10^{-7}$ м³/Кл відповідно; для двошарових плівок на основі Fe і Ge $(6 - 11) \cdot 10^{-9}$ м³/Кл при зростанні індукції магнітного поля від 0 до 80 мТл. При збільшенні інтервалу термообробки плівкових зразків до 570 К величина сталої Холла зменшується від 11 до $6 \cdot 10^{-9}$ м³/Кл, що можна пояснити процесами фазоутворення в досліджуваних зразках - формуванням магнітних фаз германідів заліза.

Робота викладена на 29 сторінках, зокрема містить 17 рисунків, таблицю, список цитованої літератури із 18 джерел.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ЕФЕКТ ХОЛЛА, ДАТЧИК ХОЛЛА, ЕРС, СТАЛА ХОЛЛА, РОЗМІРНА І ТЕМПЕРАТУРНА ЗАЛЕЖНОСТІ, ПЛІВКОВІ МАТЕРІАЛИ.

ЗМІСТ

ВСТУП	3
Розділ 1 ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ХОЛЛА НА ОСНОВІ ПЛІВКОВИХ МАТЕРІАЛІВ	5
1.1 Ефект Холла в тонких плівках.....	5
1.2 Загальні принципи дії датчиків Холла.....	9
1.3 Датчики з лінійним та логічним виходом	11
1.4 Розмірна і температурна залежності сталої Холла.....	12
Розділ 2 МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ	17
2.1 Техніка формування плівкових матеріалів.....	17
2.2 Методика вимірювання сталої Холла	19
Розділ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ	20
3.1 Конструкція і принципова схема лабораторного стенду.....	20
3.2 Результати вимірювань та їх обговорення	22
ВИСНОВКИ	26
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	27

ВСТУП

На сучасному етапі інформаційного і технологічного розвитку сенсорної електроніки велика увага приділяється дослідженню фізичних процесів в нових функціональних матеріалах. Сучасний рівень розвитку промисловості, космічної техніки, авіації, медицини, побутової техніки, наноматеріалознавства потребує розвитку контрольно-вимірювальних систем та сприяє пошуку нових матеріалів з наперед заданими магнітними властивостями [1, 2]. Останнім часом виникає інтерес до розробки і застосування методик дослідження гальваномагнітних ефектів у багатошарових плівкових системах, результати яких успішно використовуються для визначення концентрації і рухливості носіїв заряду.

Датчики Холла широко використовуються в багатьох областях сучасної промисловості: машинобудуванні, автомобільній електроніці, авіаційній техніці, зварювальному обладнанні, медичній апаратурі, побутових приладах, комп'ютерній техніці. В транспортній сфері застосовується широка номенклатура датчиків безпеки, контролю ефективності роботи двигуна, систем глобального позиціонування автомобілів [3–5]. Нові розробки для медичного діагностичного обладнання дозволяють зменшити час для отримання результатів діагнозу, безконтактні датчики роблять медичне втручання менш травматичним для пацієнтів. Датчики Холла практично нечутливі до механічних впливів і зміни параметрів навколишнього середовища, мають високу надійність, довговічність, високу швидкодію (до 100 кГц) і не вимагають фізичного контакту з вимірюваним середовищем [6].

Мета кваліфікаційної роботи магістра полягала у вивченні фізичних принципів функціонування датчиків Холла та вимірювання сталої Холла (СХ) в двошарових плівкових матеріалах на основі металів і напівпровідників.

Результати роботи представлені на Міжнародній конференції студентів і молодих вчених «Фізика, електроніка, електротехніка, ФЕЕ-2021» (м.Суми).

Матеріали кваліфікаційної роботи в 2021 році були представлені у II турі Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт в галузі «Електроніка».

Розділ 1.

ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ХОЛЛА НА ОСНОВІ ПЛІВКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

1.1 Ефект Холла в тонких плівках

Ефектом Холла називається поява у провіднику зі струмом щільністю j , поміщеним в магнітне поле H , електричного поля E_x , $H \perp j$. При цьому напруга електричного поля Холла, дорівнює:

$$E_x = R \cdot H \cdot j \cdot \sin \alpha, \quad (1.1)$$

де α кут між векторами H і J ($\alpha < 180^\circ$). Коли $H \perp j$, то величина поля Холла E_x максимальна: $E_x = RHj$. Величина R , звана коефіцієнтом Холла, є основною характеристикою ефекту Холла, відкритого в 1879 р. в тонких пластинах золота. Для спостереження ефекту Холла потрібно вздовж прямокутної пластини з досліджуваної речовини, довжина якої l значно більша ширини b і товщини d , пропускається струм:

$$I = j \cdot b \cdot d \quad (1.2)$$

Магнітне поле прикладене перпендикулярно до площини пластини. Посередині бічних граней, перпендикулярно струму, розташовані електроди,

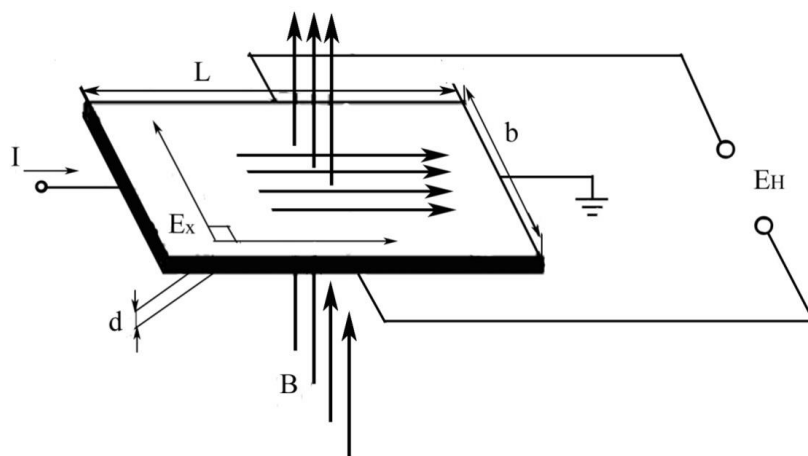


Рис.1.1. Схема для пояснення ефекту Холла. Адаптовано із роботи [3]

між якими вимірюється ЕРС Холла V_x :

$$V_x = E_x \cdot b = R \cdot H \cdot j/d. \quad (1.3)$$

Так як ЕРС Холла змінює знак на зворотний, при зміні напрямку магнітного поля на протилежний, то ефект Холла відноситься до непарних гальваномагнітних явищ.

Найпростіша теорія ефекту Холла пояснює появу ЕРС Холла взаємодією носіїв струму (дірок і електронів провідності) з магнітним полем. Під дією електричного поля носії заряду починають рухатися в певному напрямку (дрейф), середня швидкість яких (дрейфова швидкість) $v_{dp} \neq 0$. Густина струму в провіднику $j = nev_{dp}$, де n - концентрація числа носіїв, e - їх заряд. Під дією магнітного поля на носії струму діє сила Лоренца: $F = e \cdot [Hv_{dp}]$, внаслідок чого, частинки відхиляються в перпендикулярному напрямку v_{dp} і H . В результаті на гранях провідникового зразка (кінцевих розмірів) відбувається накопичення заряду і з'являється електростатичне поле - поле Холла. У свою чергу воно також діє на заряди і урівноважує силу Лоренца. В умовах рівноваги $eE_x = eHv_{dp}$, $E_x = (1/ne) \cdot Hj$, звідси знаходимо сталу Холла $R_H = 1/ne$ (см³/Кл). Її знак співпадає зі знаком носіїв заряду і дозволяє визначити тип провідності-електронну або діркову. Для металів, у яких концентрація електронів провідності близька до щільності атомів ($n \approx 10^{22}$ см⁻³), стала Холла має величину порядку 10^{-3} (см³/Кл), у напівпровідників концентрація носіїв значно менша тому - $R_H \approx 10^5$ (см³/Кл). Стала Холла може бути виражена через рухливість носіїв заряду $\mu = e\tau/m^*$ (m^* - ефективна маса носіїв, τ - середній час між двома послідовними зіткненнями з центрами, що розсіюються) і питомою електропровідністю $\sigma = j/E = env_{dp}/E$ [3]:

$$R_H = \mu/\sigma, \quad (1.4)$$

Датчики Холла знаходять широке застосування саме як кутові датчики, кут Холла визначається наступним співвідношенням:

$$\operatorname{tg} \theta_H = E_x/E_y = -\frac{q^J}{m} B = -uB = -\frac{\omega_c}{\omega_J},$$

де $\omega_c = qB/m$ - циклотронна частота носіїв заряду; ($\overline{\omega_c} = qB/m$, $\omega_c = e_0B/m$).

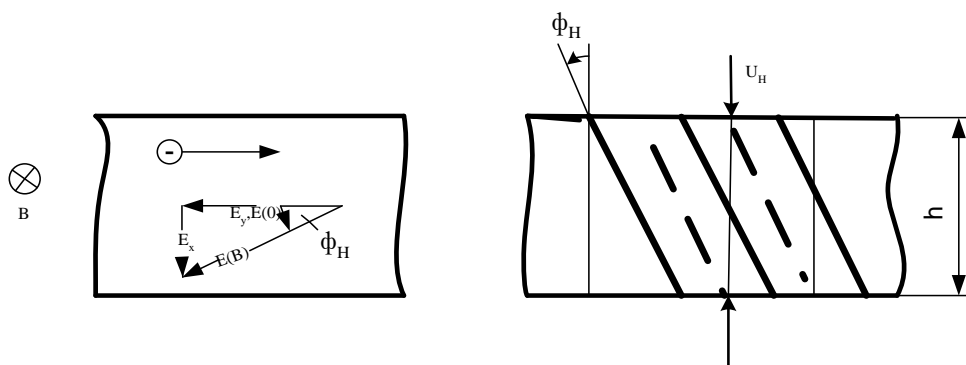


Рис.1.2. Схема визначення кута Холла. Адаптовано із роботи [5]

Макроскопічно кут Холла пов'язаний із дією магнітного поля та описується викривленням силових ліній електричного поля (або еквіпотенціальних поверхонь), мікроскопічно – частиною орбіти Ландау, яку в середньому проходить електрон між двома зіткненнями.

Кількісна оцінка кута Холла: при магнітному полі в 1Т, $m^* = m_0$, то $\omega_c = 1,8 \cdot 10^{11} \text{c}^{-1}$. Якщо порівняти величини $1/\tau$, $\operatorname{tg} \theta_H$ напівпровідника та металу, отримаємо $1/\tau = 10^{13} \text{c}^{-1}$, $\operatorname{tg} \theta_H = 2 \cdot 10^{-2}$ для напівпровідника та $1/\tau = 10^{15} \text{c}^{-1}$, $\operatorname{tg} \theta_H = 2 \cdot 10^{-4}$ – металу. При дуже малих значеннях кута Холла, наприклад в напівпровідниках або металах з низькою рухливістю, малі значення відхилення еквіпотенціалей слабо спостерігаються.

У слабких полях ($\omega_c \tau \ll 1$) кут Холла $\operatorname{tg} \theta_H \approx \omega_c \tau$, можна розглядати як кут, на який відхиляється заряд який рухається за час τ . Приведена теорія справедлива для ізотропного провідника (полікристал), у якого величини m^* і τ - постійні величини. Стала Холла (для ізотропних напівпровідників) записується через парціальні провідності (σ_e і σ_d) і концентрації електронів (n_e) і дірок (n_d) відповідно:

$$R = \frac{1}{e} \frac{\left(\frac{\sigma_e^2}{n_e}\right) - \left(\frac{\sigma_d^2}{n_d}\right)}{(\sigma_e + \sigma_d)^2} - \text{для слабких полів}; \quad (1.5)$$

$$R = \frac{1}{e} \frac{1}{(n_e + n_d)} - \text{для сильних полів.}$$

При $n_e = n_d = n$ для всієї області магнітних полів: $R_H = \frac{1}{en} \frac{\sigma_e - \sigma_d}{(\sigma_e - \sigma_d)}$. Для металів величина сталої Холла залежить від зонної структури та форми поверхні Фермі. У разі замкнутої поверхні Фермі і в сильних магнітних полях ($\omega_c \tau \gg 1$) значення сталої Холла є ізотропним, а вирази для R_H збігаються з формулою 1.5, б. Однак, якщо напрямок напруженості магнітного поля відносно кристалографічних осей вибрано так, що не виникає відкритих перерізів поверхні Фермі, то вираз для R_H аналогічний 1.5 б [7].

Стала Холла R_H виникає у магнітному полі через наявність у дрейфовій швидкості електронів v_d . Макроскопічно вимірюють струм, густина струму $j = qn v_d = qn u E_y$. Тому R_H визначають через j і вводять сталу Холла.

$$E_x = tg \varphi_H, \quad E_y = tg \varphi_H \cdot \frac{j}{qni};$$

$$E_H = -R_H B \cdot j; \quad R_H = \frac{1}{qn}.$$

Внаслідок нормування на густину струму постійна Холла залежить від концентрації, але не залежить від рухливості носіїв

$$q \cdot n = -\frac{B \cdot j}{E_H}.$$

Вимірюючи напруженість поля E_H , щільність струму j і магнітне поле B , ми можемо визначити з ефекту Холла знак і концентрацію носіїв [8].

Ефект Холла спостерігається в феромагнетиках та напівпровідникових матеріалах. У феромагнетиках на електронну провідність діє не тільки зовнішнє, але і внутрішнє магнітне поле:

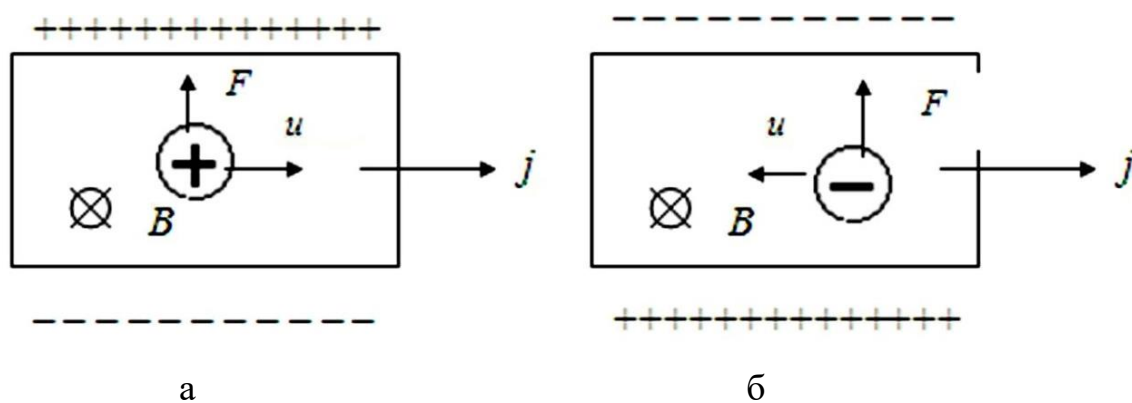


Рис.1.3. Схема виникнення ефекта Холла в матеріалах з позитивними (а) і негативними (б) носіями. Адаптовано із роботи [8]

$$B = H + M.$$

Це приводить до особливого феромагнітного ефекту Холла. експериментально знайденого, $E_x = (RB + R_a M)j$, де R_H - звичайний, а R_a - незвичайний (аномальний) коефіцієнт Холла. Між R_a і питомим електроопором феромагнетиків встановлена кореляція [5-8].

Ефект Холла спостерігається не тільки в металах, але і в напівпровідниках, причому за знаком ефекту можна судити про тип напівпровідника до n -або p -типу, так як в напівпровідниках n -типу знак носіїв струму негативний, а у p -типу – позитивний (рис. 1.3). Напрямок магнітної сили змінюється на протилежний при зміні напрямку руху заряду та його знаку. Тому у разі позитивних носіїв потенціал верхньої (рис. 1.3) грані вищий, ніж нижньої, а у випадку негативних носіїв – нижче. Таким чином, визначивши знак холлівської різниці потенціалів, можна встановити знак носіїв струму. У деяких металів холлівська напруга є позитивною, пояснення цієї аномалії дає квантова теорія [9].

1.2 Загальні принципи дії датчиків Холла

Принцип роботи датчика Холла заснований на гальваномагнітному явищу, яке показує результат взаємодії магнітного поля з напівпровідником. Напівпровідник підключений до електричного кола, що змінює його властивості. Розглянемо експериментальну методику спостереження ефекту

Холла. Як тільки з'являється поперечне напруження - виникає ефект Холла. З одного боку щілини розташований напівпровідник, за яким при включеному живленні протікає струм, а з іншого боку - постійний магніт. У магнітному полі на рухомі електрони впливає сила Лоренца, а вектор сили орієнтується перпендикулярно напрямку магнітної і електричної складових поля.

Якщо внести в магнітне поле з індукцією B напівпровідникову пластинку (наприклад, з арсеніду індію або антимоніду індію), через яку протікає електричний струм, то на бокових сторонах, перпендикулярно до напрямку струму, виникає різниця потенціалів. Між пластинкою і магнітом є щілина, у зазорі датчика знаходиться сталевий екран. Коли в зазорі немає екрану, то на пластинку напівпровідника діє магнітне поле з якої реєструється різниця потенціалів. Якщо ж у зазорі знаходиться екран, то магнітні силові лінії замикаються через екран і на пластинку не діють, в такому випадку різниця потенціалів на чутливому елементі не спостерігається [10-14]. Інтегральна мікросхема перетворює різницю потенціалів, що створюється на пластинці, в негативні імпульси напруги певної величини на виході датчика [6, 15].

У кремнії виникає тензорезистивний ефект, що полягає у зміні опору при механічних напруженнях, цей вплив в датчику Холла бажано якомога зменшити. Вирішення даної проблеми досягається відповідною орієнтацією елемента Холла на інтегральній схемі та використанням декількох елементів на кристалі. На рис. 1.8 показані два елементи Холла, розташовані поруч на кристалі мікросхеми. Вони розташовані таким чином, що зазнають практично однакову дію механічного напруження, що пов'язане із зміною R_H . До чутливого елемента (рис. 1.8 а) прикладається напруження збудження V_s , яка спрямовується по вертикальній осі, а її протидія (рис. 1.8 б) – по горизонтальній. При складанні вихідних сигналів з цих датчиків похибка внаслідок деформації кристалу компенсується [8].

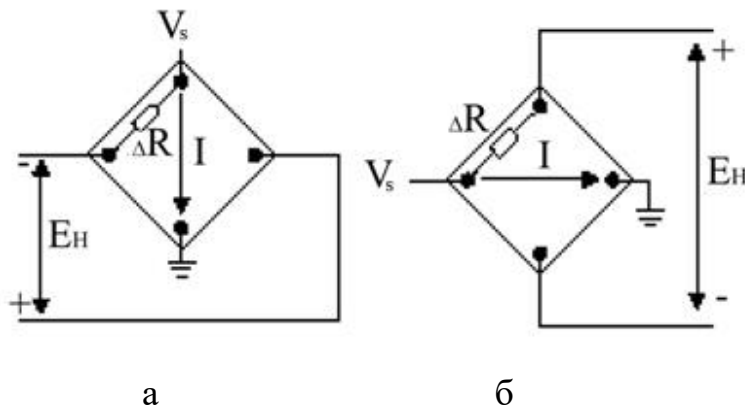


Рис. 1.8 - Розташування двох елементів Холла на мікросхемі для компенсації вкладу механічної деформації кристалу [8]

1.3 Датчики з лінійним та логічним виходом

Найбільшого поширення набули так звані ключові датчики Холла – мікросхеми, вихід яких змінює логічний стан при перевищенні напруженістю магнітного поля певної величини. Такі датчики застосовуються, зокрема, для вимірювання частоти обертання і величини переміщення рухомих об'єктів – валів електродвигунів, зубчастих коліс редукторів, транспортерних стрічок і т.п. Однак існує окремий клас інтегральних мікросхем з елементом Холла, що дозволяє значно розширити область застосування або дати розробнику більшу гнучкість при побудові системи в традиційних областях застосування, мова йде про так звані лінійні датчики Холла.

Датчики з лінійним виходом зазвичай застосовуються для визначення невеликих переміщень, побудови більш складних датчиків і роботи у складі датчиків струму з гальванічною розв'язкою. Лінійні датчики магнітного поля (на ефекті Холла) складаються з напівпровідникового елемента Холла, стабілізатора живлення, диференціального підсилювача і вихідного каскаду. Інтегральні датчики Холла виробляють такі фірми як: Honeywell, Melexis, AllegroMicrosystems, MicronasIntermetall, Siemens, AnalogDevices і ін. Перша група інтегральних датчиків Холла - це лінійні пристрої, що застосовуються при вимірюванні напруженості магнітного поля. Як правило, ці пристрої містять схеми підсилення сигналу датчика. Необхідна попередня обробка сигналу зазвичай полягає в посиленні і температурній компенсації. Може

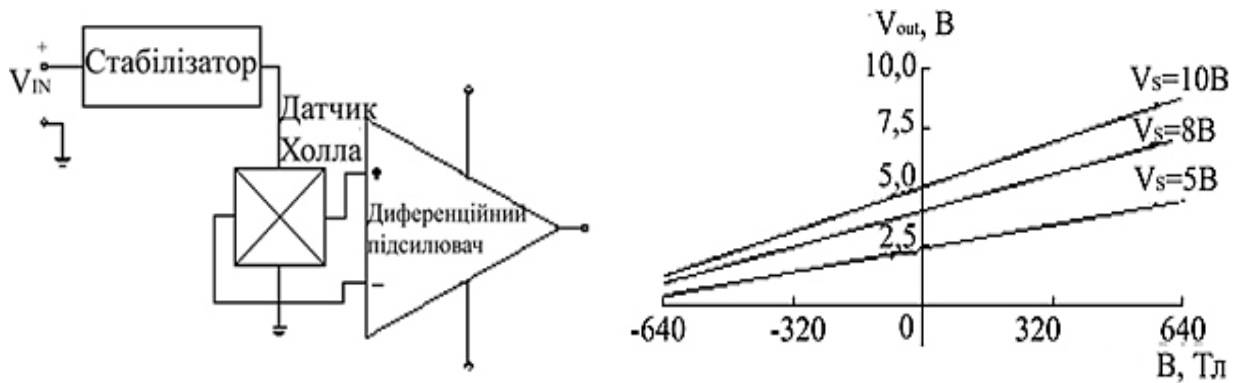


Рис. 1.9. Мікросхема лінійного датчика Холла (а) і графік вихідного сигналу (б). Із роботи [9]

знадобитися також стабілізація напруги живлення. При відсутності зовнішнього магнітного поля вихідна напруга датчика повинна дорівнювати нулю, тому потрібно диференціальний підсилювач (рис. 1.9).

Сучасні технології дозволяють ввести до складу ІМС датчиків магнітного поля складні цифрові системи обробки інформації. Прикладом такої ІМС може служити HAL805 фірми Micronas Intermetall, містить на кристалі в трьох вивідному корпусі ТО92 АЦП, ЦАП (корпус вітчизняного транзистора, аналого-цифровий перетворювач, цифровий-аналоговий перетворювач) і енергонезалежну пам'ять [9–14]. Така структура дозволяє програмувати чутливість і зсув датчика, здійснювати фільтрацію перешкод і механічних збурень. Друга група включає в себе мікросхеми компараторного типу з логічними рівнями напруги на виході. Мікросхеми з логічним виходом (рис. 1.9 а) діляться на дві підгрупи: перемикачі та тригери. Уніполярний перемикач спрацьовує тільки за наявності магнітного поля однієї полярності і гарантує вимкнений стан за відсутності магнітного поля; магнітне поле протилежної полярності не чинить на нього жодного впливу (рис. 1.9 б).

1.4 Розмірна і температурна залежність сталої Холла

Сьогодні значну зацікавленість викликають розробки і застосування методів дослідження ефекту Холла в багатошарових плівкових системах. На основі

перетворювачів Холла створені амперметри для вимірювання електричного струму до 100 кА, вимірювачі кутових і лінійних зміщень, прилади для вимірювання градієнту магнітного поля і потоку, голівки для відтворення відео-та звукозапису, перетворювачі постійного струму в змінний [15].

На характер розмірної і температурної залежностей сталої Холла впливають зонна структура (природа) зразка, механізми розсіювання електронів провідності на магнітних моментах і процеси розсіювання, пов'язані із спін-орбітальною взаємодією. У роботі [16] наводяться дані для сталої Холла (R_H) епітаксіально вирощених плівок ГЦТ-PdFe товщиною 31 нм. Класична стала Холла при $T = 50$ і 270 К складає $(-0,28$ і $-0,16) \cdot 10^{-9}$ м³/Кл, а аномальна R_S – $(0,1$ і $1,4) \cdot 10^{-9}$ м³/Кл, відповідно. Авторами роботи [17] була запропонована теоретична модель для розрахунків сталої Холла на прикладі багат шарових плівкових систем Та/Cu та Ni/Cu:

$$R_H = (d_1 + d_2) \cdot \left(\frac{R_{H1}\rho_2^2 d_1 + R_{H1}\rho_1^2 d_2}{(\rho_2 d_1 + \rho_1 d_2)^2} \right), \quad (1.6)$$

де d_1 і d_2 , ρ_1 і ρ_2 – товщина та питома провідність для матеріалу 1 і 2-го шарів; R_{H1} і R_{H2} – сталі Холла, які відповідають товщинам d_1 і d_2 , відповідно.

Суцільні плівкові шари зразків розглядалися авторами як паралельне з'єднання двох провідників. Зі зменшенням загальної товщини системи спостерігалось збільшення напруги Холла, що пов'язано з дифузним розсіюванням електронів на межі інтерфейсів, розмірними ефектами.

Труднощі вимірювання ефекту Холла в діелектричній області пов'язані з асиметрією в розташуванні холловських зондів і паразитним впливом гігантського магнітоопору, що виникає в цих умовах, крім того – різким збільшенням додаткових шумів, властивих перколяційним системам. Автори [18] дослідили ефект Холла в гранульованих плівках Fe/SiO₂. На рис. 1.10 представлено сімейство кривих опору Холла залежно від напруженості магнітного поля при різних температурах для зразків із стрибковою ($x \approx 0,5$) і металевою ($x \approx 0,7$) провідністю. Видно, що в обох зразках залежність R_H

помітно насичуються, що характерно для пропорційної намагніченості аномального ефекту Холла у неупорядкованих феромагнітних металах.

Той факт, що в діелектричній області зберігаються як знак ефекту Холла, так і загальний характер залежності R_H , очевидно, означає, що в обох випадках за ефект Холла відповідає спін-орбітальна взаємодія, що впливає на транспорт спін-поляризованих електронів. При кімнатних температурах поблизу перколяційного переходу композити мають феромагнітні властивості, але зі зменшенням вмісту переходять у супермагнітний стан. Залежність намагніченості від магнітного поля трансформується при цьому в більш заокруглену ланжевенівську функцію [17].

Авторами роботи [18] проводилися дослідження плівок чистого вісмуту та легovanого телуrom. Як підкладка використовувалася слюда мусковіт, товщиною 10 – 20 мкм. Дослідження показали, що плівки мають блокову структуру з перпендикулярною орієнтацією осі до площини підкладки. Середні розміри кристалітів у площині плівки набагато більші товщини плівки. Одним з основних причин, що дають значний вплив на фізичні властивості плівок, є класичний розмірний ефект – обмеження довжини вільного пробігу носіїв заряду товщиною плівки. У випадку блокових плівок, класичний розмірний ефект може проявлятися в розсіюванні носіїв заряду на міжкристалітних границях. На отриманих тонкоплівкових зразках було проведено дослідження гальваномагнітних властивостей у температурному інтервалі від 77 К до 300 К і в магнітному полі до 0,6 Тл.

На рис. 1.11 наведені температурні залежності сталої Холла для плівки товщиною 300 нм у діапазоні температур підкладки від 80 до 200 °С. Вісмут має сильну анізотропію властивостей носіїв заряду та однакову концентрацію електронів і дірок. Слід зазначити, що анізотропія електронів і дірок істотно різна. Електрони мають максимальну рухливість уздовж осі C_3 , а дірки в перпендикулярному напрямку, тобто в тригональній площині. Тому поведіння коефіцієнта Холла при зміні температури буде визначатися співвідношенням рухливості електронів і дірок. При підвищенні температури рухливості

електронів і дірок стають однаковими, тому значення сталої Холла при високій температурі має маленьке значення. В області низької температури, де проявляється класичний розмірний ефект, обмеження рухливості електронів більш суттєве, ніж дірок, що пояснює додатне значення сталої Холла.

На рис. 1.12 наведена температурна залежність сталої Холла для плівок Ві, легованих телуrom у магнітному полі 0,65 Тл. Із графіка видно, що коефіцієнт для всіх плівок негативний і зі зменшенням температури його абсолютна величина збільшується. В області низьких температур швидкість зміни коефіцієнта Холла сповільнюється в порівнянні з областю високих температур. Це пов'язане з тим, що концентрація носіїв заряду в області низьких температур постійна. Можна відзначити, що збільшення дефектності кристалічної структури плівки, а, отже, зменшення рухливості носіїв заряду, приводить до збільшення коефіцієнта Холла по абсолютній величині. Ілюстрацією цього на рис. 1.12. є порівняння Холла для плівок товщиною 0,46 та 0,4 мкм. В області температур вище температури переходу до власної провідності (200 К), зменшення коефіцієнта Холла по абсолютній величині обумовлено внеском носіїв іншого знака – дірками.

Для плівок чистого Ві малої товщини стала Холла є позитивною і росте зі зменшенням температури. Для легованих телуrom зразків вісмуту стала Холла - негативна і збільшується по абсолютній величині зі зниженням температури, однак, при низькій температурі її величина спрямовується до насичення [16].

Авторами роботи [17] проводилися дослідження магнітних властивостей тонких плівок ZnO, легованих Со. Вимірювання температурних залежностей опору, ефекту Холла були виконані стандартною чотирьохконтактною методикою в кріостаті ($T = 1,3 - 295$ К) у магнітному полі $B = 6$ Тл. Залежність ЕРС Холла від магнітного поля в плівці нелегованого ZnO є лінійною у всьому дослідженому інтервалі температур і магнітних полів. У плівках Zn, легованого кобальтом, лінійна сталої Холла від магнітного поля спостерігалася при температурах вищих 77 К. При більш низьких температурах залежність ЕРС Холла від магнітного поля в плівках, що містять Со, була лінійною.

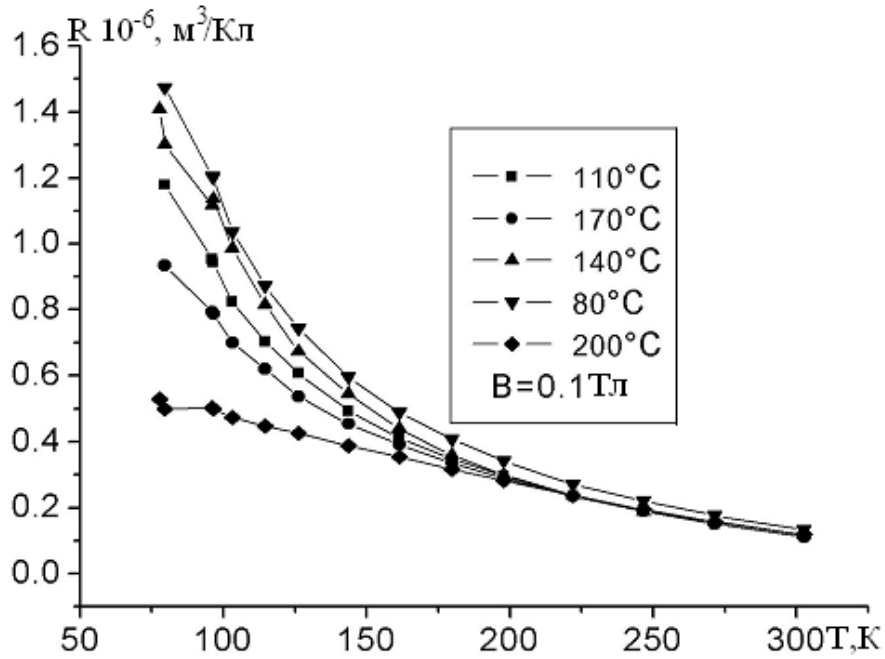


Рис. 1.10. Залежність сталої Холла від температури для плівки Ві в інтервалі температур підкладки від 80 °С до 200 °С у магнітному полі з індукцією 0,1 Тл. Адаптовано із роботи [16]

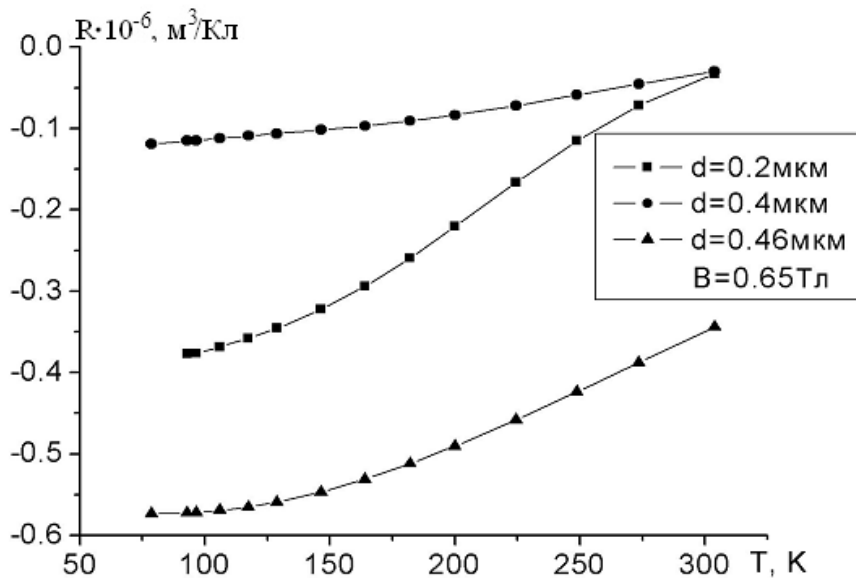


Рис.1.11. Температурна залежність сталої Холла для плівки Ві товщиною 0,2; 0,4 та 0,46 мкм. Адаптовано із роботи [16]

Така температурна залежність ЕРС Холла вказує на перевагу переносу електронів у зоні провідності при високих температурах і стрибкового транспорту при низьких. Коли основний внесок в електропровідність дають електрони в зоні провідності, стала Холла пов'язана з концентрацією електронів співвідношенням $n = 1/eR_{\text{нд}}$. Результати розрахунку концентрації і відповідних рухливостей представлені у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Концентрація та рухливість у зоні провідності, розраховані при температурах 77 і 300 К [19]

Вміст Со, ат. %	$n_{300}, 10^{19}\text{см}^{-3}$	$n_{77}, 10^{19}\text{см}^{-3}$	$\mu_{300}, \text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$	$\mu_{77}, \text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$
0	9,4	–	26,5	–
1,5	1,1	1,0	10,0	6,7
6,3	0,67	0,27	4,1	8,3

Концентрації та рухливості були розраховані при високих температурах, коли перенос електронів у зоні провідності повинен давати основний вклад в електропровідність [16].

Розділ 2.

МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

2.1 Технологія формування плівкових матеріалів

Нами були проведені дослідження ефекту Холла в одношарових плівках Fe і Ge та двошарових зразках на основі Fe і Ge, які отримувалися методом термічного випарування у вакуумі $P = 10^{-4}$ Па. Контроль товщини плівкових зразків здійснювався за допомогою автоматизованої системи (рис. 2.1), оскільки даний параметр суттєво впливає на вихідні характеристики. У вакуумній камері ВУП-5М (а) конденсувалась плівка на кварцову підкладку, яка в свою чергу приєднана до генератора, який підключений до частотоміра (б) та за допомогою COM – USB адаптеру (в) з'єднаний з комп'ютером (г). Матеріали для випаровування розміщувалися на однаковій відстані від зразка та розділялися заслінкою. Кварцова підкладка приєднувалась до генератора імпульсів частотою 10МГц. Для контролю величини магнітного поля використовувався автоматичний комплекс, що складався із 8-канального, 16-бітного АЦП ADAM-4118, перетворювача інтерфейсів ADAM-4520, схеми керування джерелом високого струму, персонального комп'ютера (рис. 2.2).

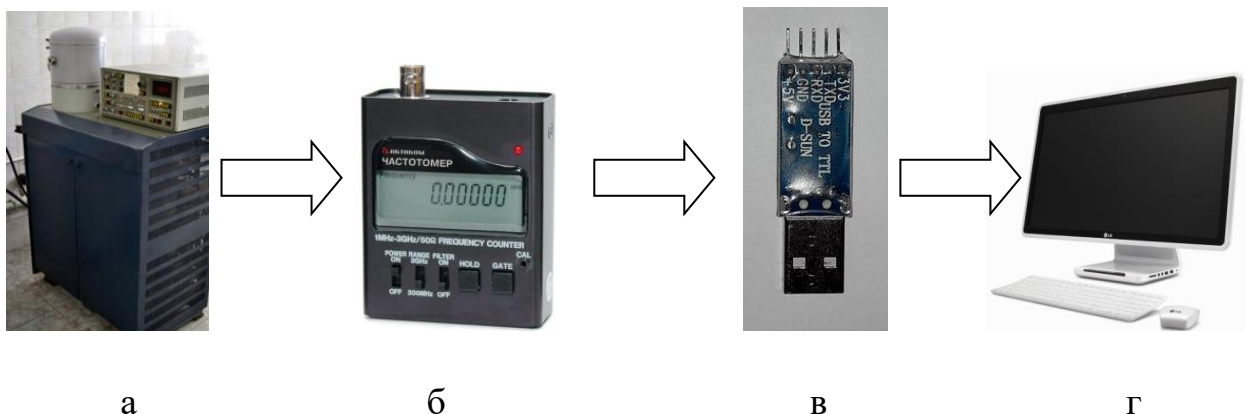
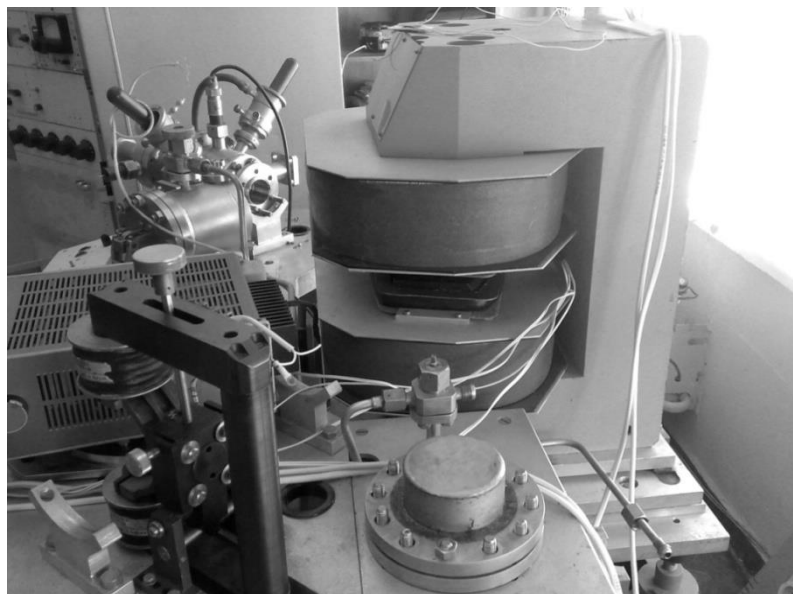
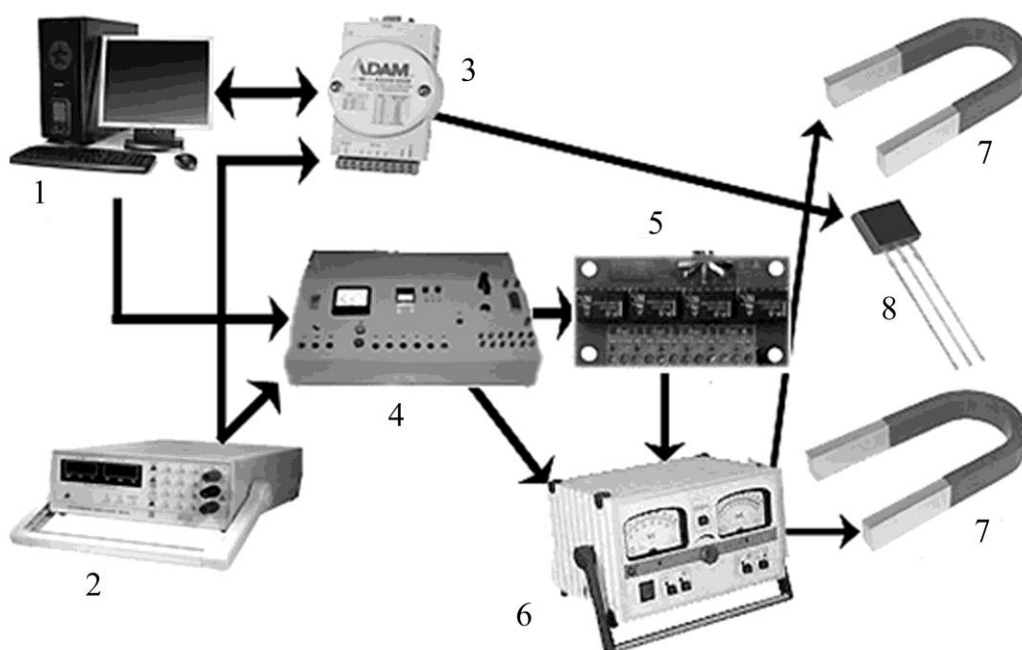


Рис. 2.1. Схема автоматизованого контролю товщини плівкових зразків під час конденсації: ВУП-5М (а), частотомір (б), COM – USB адаптер (в), комп'ютер (г)



а



б

Рис.2.2. Зовнішній вигляд автоматизованого комплексу для вимірювання гальваномагнітних властивостей (а) та його схематичне зображення (б): 1 – персональний комп'ютер; 2 – джерело живлення, 3 – ADAM-4520; 4 – блок керування джерелом струму, 5 – блок реле, 6 – джерело високого струму, 7 – магніти; 8 – зразок (датчик SS49)

2.2 Методика вимірювання сталої Холла

Для дослідження ефекту Холла в плівкових наноструктурах довільної геометричної форми використовується методика Ван дер Пау [15], яка дозволяє вимірювати величини питомого опору та R_H .

Чотирьохточковий метод базується на явищі розходження струму в точці приєднання контакту металічного вістря з поверхнею плівки. Якщо товщина шару є не значною в порівнянні з відстанями між загостреними зондами та краї плівки знаходяться на достатньо великій відстані від них, то напруга при розташуванні зондів вздовж прямої лінії визначається виразом [15]:

$$U = \frac{IR_s}{2\pi(\ln 2 - \ln 0.5)}$$

Опір визначається за співвідношенням:

$$R_s = \frac{\pi}{\ln 2} \frac{U}{I} = 4,532 \frac{U}{I} = C \frac{U}{I},$$

де I – струм через зовнішні електроди; U – різниця потенціалів, що вимірюється між двома внутрішніми зондами вольтметром з високим вхідним опором; C – коефіцієнт, який залежить від геометрії досліджуваного зразка та геометрії розташування зонда на поверхні.

При пропусканні через контакти постійного електричного струму (наприклад, $I = 1$ мА), між ними виникає різниця потенціалів (U_H), яка використовувалася для визначення сталої Холла:

$$R_H = \frac{U_H \cdot d}{I \cdot B} = \frac{d \cdot ((U_{42}^+ - U_{24}^+) + (U_{24}^- - U_{42}^-) + (U_{31}^+ - U_{13}^+) + (U_{13}^- - U_{31}^-))}{2 \cdot B \cdot I}$$

Для нанорозмірних плівок величина напруги Холла обернено пропорційна товщині плівки, що обумовлює високі значення напруги і чутливості $S = (\Delta U_{\text{вих}}/U_0)/(\Delta B/B_0)$ при малих товщинах. Мініміально можливе значення постійного струму при вимірюванні опору визначається чутливістю вимірювальних пристроїв, максимальне – ступенем нагрівання зразків.

Розділ 3.

РЕЗУЛЬТАТИ ВИМІРЮВАНЬ ЕФЕКТУ ХОЛЛА

Фізичні аспекти ефекту Холла можна пояснити на основі електронної теорії провідності. При відсутності зовнішнього магнітного поля струм в плівці обумовлений лише електричним полем. Потенціал в кожній точці еквіпотенціальної поверхні однаковий. При появі магнітного поля на всі носії струму починає впливати сила Лоренца, що спричиняє відхилення електронів від прямолінійного руху до країв зразка. В роботі значення сталої Холла наводимо по модулю.

3.1 Конструкція і принципова схема лабораторного стенду

Для дослідження фізичних характеристик чутливих елементів плівкових датчиків Холла був виготовлений лабораторний стенд, зовнішній вигляд і електрична схема якого наведені на рис.3.1 – 3.3. Для конструювання лабораторного стенда використовувались джерело постійної напруги, електромагніт, мультиметри, регульований блок живлення з робочою напругою від 0 до 15 В.

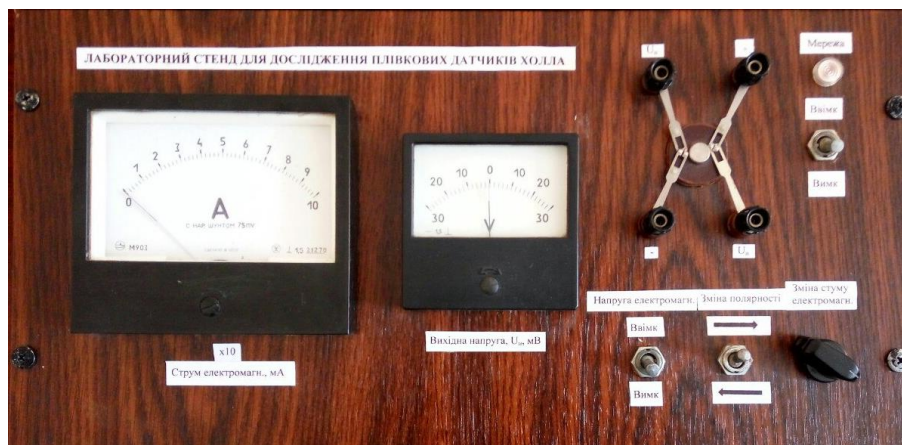


Рис.3.1. Зовнішній вигляд лабораторного стенда для вимірювання сталої Холла

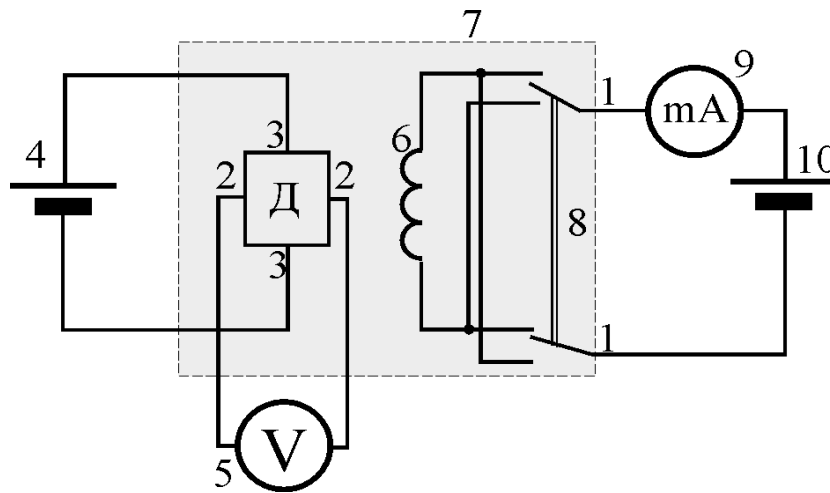


Рис. 3.2. Принципова схема лабораторного стенду:

(1-1) ланцюг живлення електромагніта 6: регульоване джерело постійної напруги 10, перемикач 8, мультиметр 9;

(2-2) - ланцюг вимірювання напруги Холла мультиметром 5;

(3-3) - ланцюг живлення зразка Д: 4-джерело постійної напруги «+15 В»;

7 - мініблок «Ефект Холла»

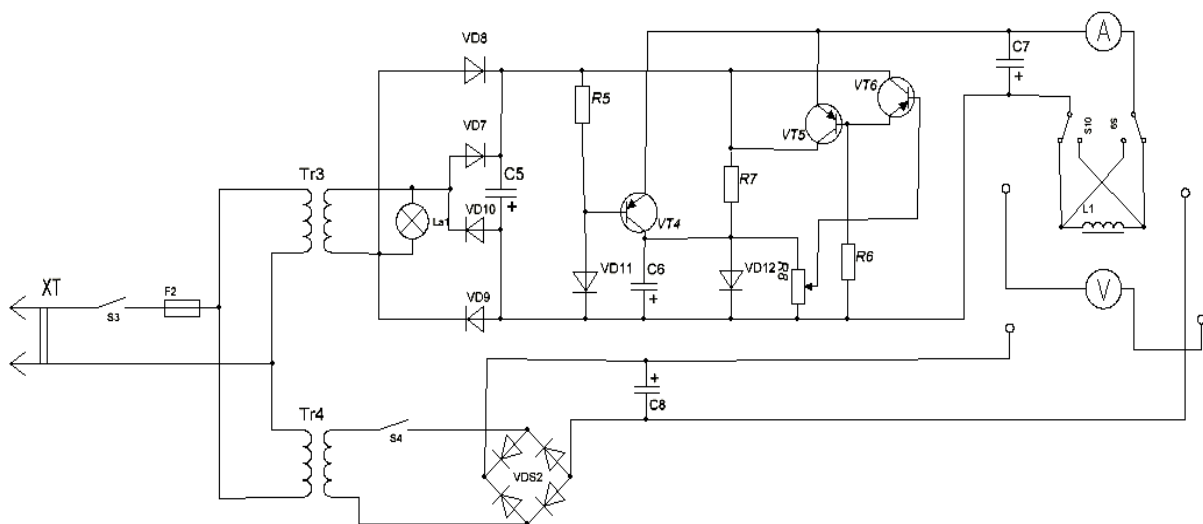


Рис.3.3. Електрична схема лабораторного стенду

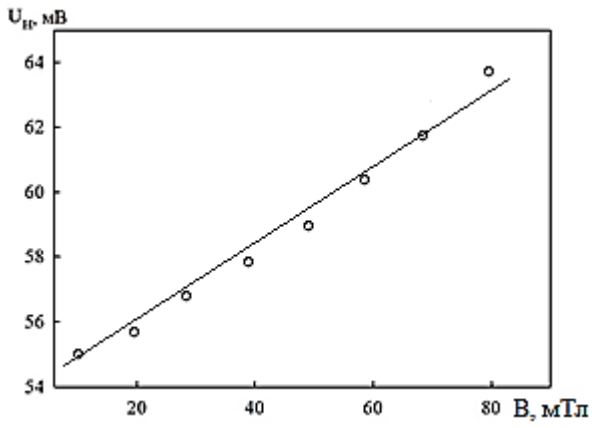
Досліджуваний зразок (Д) являє собою плівку, яка підключена до джерела постійної напруги 4 і поміщений в зазор сердечника електромагніта 6. Обмотка електромагніту через перемикач 8 з'єднана з регульованим джерелом постійної напруги 10. За допомогою перемикача можна змінювати напрямок струму в обмотці електромагніту, а значить і напрям вектора індукції магнітного поля в зазорі сердечника. Напруга Холла вимірюють цифровим вольтметром 5.

Вхід В підключається до землі. Вхід С - до джерела напруги «+15 В». На вхід А підводиться регульоване напругі «0 ... +15 В». З виходів DE знімається напруга з датчика Холла. Електромагнітом є котушка з мідного дроту намотана на металеве осердя. Кількість витків становить $N=7000$ витків. Діаметр дроту $\varnothing 0,125$ мм, діаметр осердя складає $\varnothing 7$ мм.

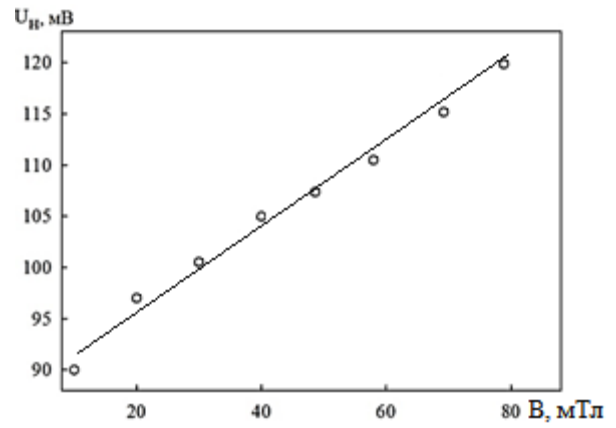
3.2 Результати вимірювань та їх оговорення

У зв'язку з розвитком сучасного напрямку магнітоелектроніки - спінтроніки, дослідженню ефекту Холла приділяється велика увага, оскільки на його основі можуть бути створені високочутливі вимірювачі магнітного поля, мікроелектронні компаси, датчики переміщення та вимірювання частоти обертання. Останнім часом великий інтерес викликає розробка і застосування методик дослідження ефекту Холла в багатошарових плівкових системах, результати яких успішно використовуються для визначення концентрації і рухливості носіїв заряду. На основі датчиків Холла розроблені амперметри для вимірювання електричного струму до 100 кА, вимірювачі лінійних і кутових переміщень, прилади для вимірювання градієнта магнітного поля і магнітного потоку, безконтактні перетворювачі постійного струму в змінний, голівки для відтворення звуко- та відеозапису.

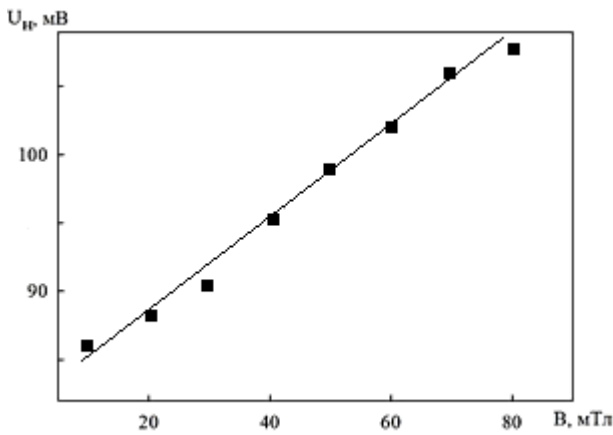
В області власної провідності знак ЕРС Холла відповідає знаку носіїв із більшою рухливістю.. Надалі величину R_H ми будемо розглядати по модулю.



а

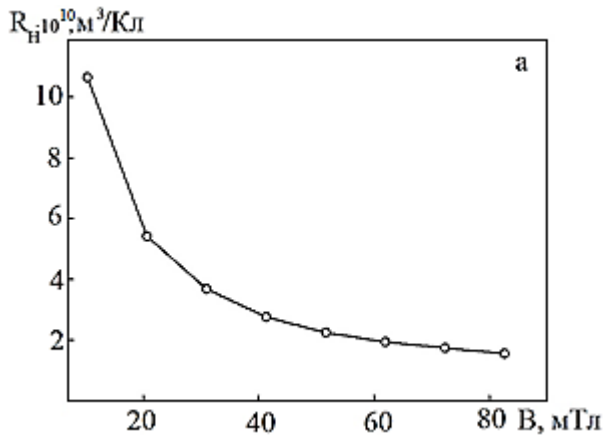


б

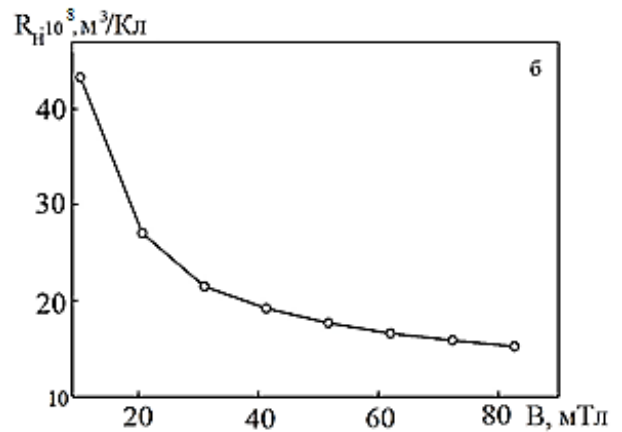


в

Рис.3.4. Залежність величини напруги Холла від індукції магнітного поля: а – Fe(30)/П при $T_B = 450$ К; б – Fe(30)/Ge(30)/П при $T_B = 450$ К; в – Fe(30)/Ge(30)/П при $T_B = 570$ К. П – підкладка, в дужках вказана товщина в нм



а



б

Рис. 3.5. Залежність величини сталої Холла від індукції магнітного поля для одношарових плівок Fe(30)/П(а) і Ge(30)/П(б) після відпалювання до $T_B = 450$ К

З використанням розробленого лабораторного стенду були проведені експериментальні дослідження ефекту Холла в одношарових плівках Ge і Fe та двошарових системах на основі плівок Fe і Ge, отриманих на ситалових підкладках методом термічного випаровування та які пройшли термообробку при різних температурах відпалювання протягом 3-х термостабілізаційних циклів «нагрів - охолодження».

На рис.3.4 наведені залежності величини напруги Холла від індукції магнітного поля для одно- і двошарових плівок [22]. Із рисунка видно, що при переході феромагнітна плівка \rightarrow феромагнетик/напівпровідник/П при однакових температурах підкладки напруга Холла збільшується в 1,5 – 2,0 рази (від 64 до 120 мВ при $B = 80$ мТл). На основі визначеної величини постійної Холла була розрахована сумарна концентрація носіїв заряду (електронів і дірок) в двошарових плівках Fe(20)/Ge(20)/П, величина якої склала $\sim 10^{28}$ 1/м³. Як видно із рисунків 3.4 – 3.6 при зростанні індукції магнітного поля від 0 до 80 мТл величина S_H зменшується: від 11 до $1 \cdot 10^{-10}$ м³/Кл (одношарові плівки Fe) та від $35 \cdot 10^{-9}$ до $2,5 \cdot 10^{-9}$ м³/Кл (двошарові плівки - Fe(20)/Ge(20)/П).

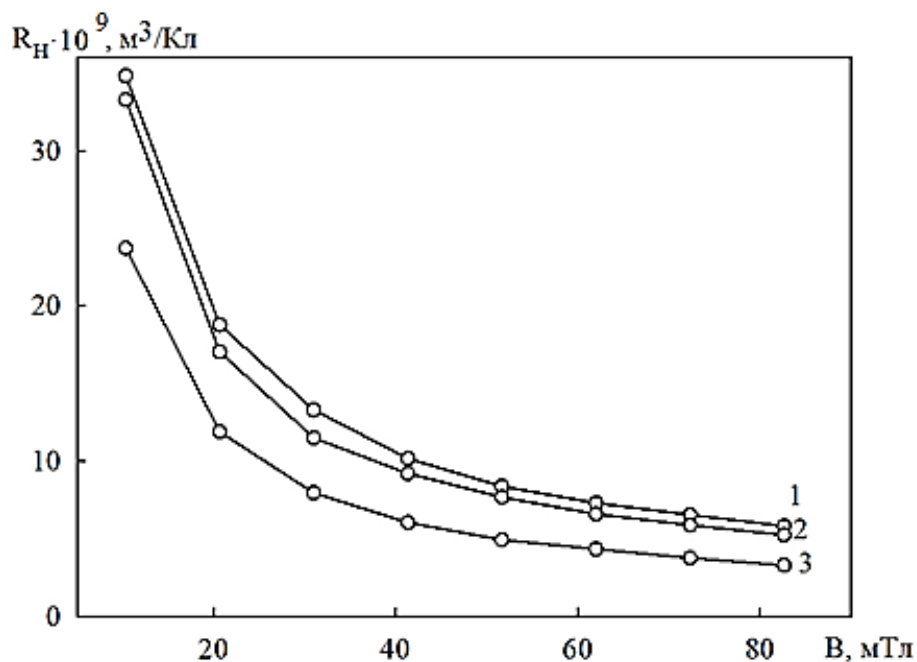


Рис. 3.6. Залежність величини сталої Холла від індукції магнітного поля для двошарових плівок Fe(30)/Ge(30)/П після відпалювання, T_B : 1 – 450 К; 2 – 530 К; 3 – 570 К

На величину сталої Холла суттєво впливають концентрація носіїв заряду та їх рухливість, питома провідність матеріалу, густина струмів, що протікають через зразок, величина прикладеного магнітного поля, межі поділу окремих шарів [18]. Крім цього слід відмітити, що у феромагнітних шарах на електрони провідності діє не тільки зовнішнє, але і внутрішнє магнітне поле.

Удосконаленням лабораторного стенду в перспективі буде розширення діапазону магнітних полів для підвищення точності вимірювань.

Оцінка концентрації носіїв заряду в двошарових плівкових матеріалах на основі Fe і Ge різної товщини проведена на основі співвідношень:

$$R_H = 1/(ne), \quad n = 1/(R_H \cdot e),$$

де n – концентрація електронів; e – заряд електрона.

Отримано, що концентрація носіїв заряду в двошарових плівках Fe(30)/Ge(30)/П складає $2,5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ (450 К) і $1,8 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ (570 К), що на порядок менше, ніж в одношарових плівках заліза. Це пов'язано із екситонним механізмом провідності в системах метал/напівпровідник.

Таким чином, результати дослідження ефекту Холла в плівкових зразках вказують на те, що на характер розмірної і температурної залежностей SX впливають зонна структура (природа) зразка, механізми розсіювання електронів провідності на магнітних моментах і процеси розсіювання, пов'язані із спін-орбітальною взаємодією. Зменшення величини SX від 11 до $6 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{Кл}$ при збільшенні температури відпалювання плівкових зразків на основі Fe і Ge можна пояснити процесами фазоутворення в системах (формування магнітних фаз FeGe₂, FeGe та ін.).

ВИСНОВКИ

1. Аналіз літературних даних показує, що на основі ефекту Холла функціонують датчики, які використовуються у безколекторних електродвигунах, високочутливих вимірювачах магнітного поля, мікроелектронних компасах, датчиках переміщення, вимірювання частоти обертання.

2. Установлено, що залежність величини напруги Холла від індукції магнітного поля носить лінійний характер, що дозволяє застосовувати такі плівки для конструювання датчиків магнітного поля, і має величину: 55-65 мВ (одношарові плівки Fe(20-30); 90-120 мВ (двокомпонентні плівки Fe(30)/Ge(30)/П, відпалені до $T = 450$ К) та 80-130 мВ (двокомпонентні плівки Fe(30)/Ge(30)/П, відпалені до $T = 570$ К), що говорить про можливість застосування таких плівок як чутливих елементів датчиків магнітного поля.

3. Показано, що величина сталої Холла для плівкових матеріалів залежить від загальної товщини плівки, її фазового складу та інтервалу термовідпалювання.

4. Експериментально встановлено, що величина сталої Холла для одношарових плівок Fe і Ge складає $(1 - 10) \cdot 10^{-10}$ і $(2 - 5) \cdot 10^{-7}$ м³/Кл відповідно; для двошарових плівок на основі Fe і Ge $(6 - 11) \cdot 10^{-9}$ м³/Кл при зростанні індукції магнітного поля від 0 до 80 мТл. При збільшенні інтервалу термообробки плівкових зразків до 570 К величина сталої Холла зменшується від 11 до $6 \cdot 10^{-9}$ м³/Кл, що можна пояснити процесами фазоутворення в досліджуваних зразках - формуванням магнітної фази Fe₂Ge.

5. Отримано, що концентрація носіїв заряду в двошарових плівках Fe(30)/Ge(30)/П ($c_{\text{Fe}} = 66$ ат.%, $c_{\text{Ge}} = 34$ ат.%) складає $2,5 \cdot 10^{28}$ м⁻³ (450 К) і $1,8 \cdot 10^{28}$ м⁻³ (570 К), що на порядок менше, ніж в одношарових плівках заліза. Це можна пояснити екситонним механізмом провідності в системах метал/напівпровідник.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Development of magnetoresistive sensors based on planar Hall effect for applications to microcompass / F. Moutaigne, A. Schuhl, F. Nguyen Van Dau // *Sensor Actuat. A-Phys.* – 2000. – V. 81. – P. 324.
2. 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.
3. Матеріали і компоненти функціональної електроніки: навчальний посібник (електронне видання) / Л.В. Однодворець, І.М. Пазуха. – Суми: Сумський державний університет, 2020. – 196 с.
4. Трунов О. М. Датчики та сенсори робототехнічних систем. – 2020. – Миколаїв: ЧНУ. – 39 с.
5. 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.
6. Sensor and microelectronic elements based on nanoscale granular systems (review) / S.A.Nepijko, D. Kutnyakhov, L.V. Odnodvoret, S.I. Protsenko, G.J. Schonhense // *J. Nanopart. Res.* – 2011. – V.12 (13). – P.6263 – 6281.
7. Anomalous Hall effect magnetometry studies of magnetization processes of thin films / J.R. Lindemuth, B.C. Dodrill // *J. Magn. Magn.Mater.* – 2004. - V. 272-276. – P. 2324-2325.
8. Джексон Р.Г. Новейшие датчики. – Москва: Техносфера, 2017. – 384 с.
9. Матвієнко М.П. Основи електроніки: підручник. – Київ: Видавництво Ліра-К, 2017. – 364 с.
10. Матвійків М.Д., Когут В.М., Матвійків О.В. Елементна база електронних апаратів. – Львів: Вид-во НТУ «Львівська політехніка», 2018. – 428 с.

11. Крилик Л.В., Селецька О.О. Матеріали електронної техніки: навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2017. – 120 с.
12. Будіщев М. С. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка. – Львів: Афіша, 2001. – 424 с.
13. Шликов В.В. Мікропроцесорна техніка: Практикум [Електронний ресурс / В.В. Шликов; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові данні (1 файл: 3,1 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 144 с.
14. Resistivity and the Hall effect in polycrystalline Ni-Cu and Ta-Cu multi-layered thin films / G. Reiss, K. Kapfberger, G. Meier, J. Vancea, H. Hoffmann // Phys. Condens. Matter. – 1989. – V. L. – P. 1275 – 1283.
15. Van der Pauw L.J. A method of measuring specific resistivity and Hall effect of discs of arbitrary shape / L.J. van der Pauw // Philips Res. Repts. – 1958. – V. 13, №1. – P. 1 – 9.
16. Spin-orbit strength driven crossover between intrinsic and extrinsic mechanisms of the anomalous Hall effect in the epitaxial $L1_0$ -ordered ferromagnets FePd and FePt / К.М. Seemann, Y. Mokrousov, A. Aziz // Phys. Rev. Lett. – 2010. – V. 104. – P. 076402-1 – 076402-4.
17. Investigation of perpendicular anisotropy of a thin film using the planar Hall effect / F.G. Ogrin, S.L. Lee, Y.F. Ogrin // J. Magn. Magn. Mater. – 2000. – V. 219. – P. 331.
18. Толстіков Д.І., Лизогуб І.О., Однодворець Л.В. Ефект Холла в функціональних плівкових матеріалах / Програма і матеріали Міжнародної науково-технічної конференції студентів і молодих вчених «Фізика, електроніка, електротехніка, ФЕЕ-2021». – 2021. – Суми: СумДУ. – С.76.