

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

Кафедра електроніки,
загальної та прикладної фізики

Кваліфікаційна робота бакалавра

**ДАТЧИКИ ХОЛЛА ЯК ЕЛЕМЕНТИ КОНТРОЛЬНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ
ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ**

Студент гр.ЕП-71

І.О. Лизогуб

Науковий керівник,
д-р фіз.-мат. наук, професор

Л.В. Однодворець

Завідувач кафедри ЕЗПФ,
д-р фіз.-мат. наук, професор

І.Ю.Проценко

Суми 2021

РЕФЕРАТ

Об'єкт дослідження кваліфікаційної роботи бакалавра: фізичні процеси в датчиках Холла як елементах контрольно-вимірювальних систем.

Мета роботи полягала у вивченні фізичних процесів в чутливих елементах плівкових датчиків Холла та вимірюванні напруги і сталої Холла в одношарових металевих плівкових матеріалах.

Вивчені питання стосовно фізичних принципів функціонування, конструкції та галузей застосування ефекту Холла. Показано, що на основі ефекту Холла функціонують прилади для вимірювання напруженості магнітного поля.

Освоєна методика вимірювання ефекту Холла в плівкових матеріалах з використанням лабораторного стенду. Проведені вимірювання сталої Холла в одношарових металевих плівках Fe, Cr, Cu, і Al товщиною $d \cong 40$ нм. Установлено, що її величина по модулю складала: $(5,1; 3,8; 0,9; 0,7) \cdot 10^{-10}$ м³/К відповідно.

Проведена розрахункова оцінка концентрації електронів у плівках різних металів однакової товщини. Отримано, що концентрація електронів змінюється від $(1,2-1,6) \cdot 10^{28}$ м⁻³ (Fe і Cr) до $(7,0-8,9) \cdot 10^{28}$ м⁻³ (Cu і Al), що підтверджується більш високою електронною провідністю Cu і Al у порівнянні з Fe і Cr.

Робота викладена на 35 сторінках, зокрема містить 8 рисунків, список цитованої літератури із 30 джерел.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ЕФЕКТ ХОЛЛА, СИЛА ЛОРЕНЦА, МЕТАЛЕВА ПЛІВКА, СТАЛА ХОЛЛА, КОНЦЕНТРАЦІЯ ЕЛЕКТРОНІВ.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1 ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ В ДАТЧИКАХ ХОЛЛА	6
1.1. Ефект Холла	6
1.2. Параметри і характеристики датчиків на основі ефекту Холла.....	14
1.3. Виготовлення та застосування датчиків Холла.....	18
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ	21
2.1. Фізичні основи функціонування датчиків Холла.....	21
2.2. Конструкція і принципова схема лабораторного стенду	24
2.3 Результати вимірювань та їх обговорення	26
ВИСНОВКИ	28
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	29

ВСТУП

Гальваномагнітні ефекти (ГМЕ) – це сукупність явищ, пов'язаних з дією магнітного поля на електричні властивості провідників, по яким протікає струм. До них відносяться ефект Холла – виникнення різниці потенціалів (ЕРС Холла) у напрямку, який перпендикулярний полю і поперечний магніторезистивний ефект – зміна електричного опору провідника під впливом магнітного поля. ЕРС Холла в феромагнітних плівках визначається поведінкою намагніченості [1], а її величина тим більша, чим менша товщина плівки.

У зв'язку з розвитком нанoeлектроніки і 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 [2, 3], проведений аналіз анізотропних процесів на межі поділу систем феромагнетик/антиферомагнетик [4], вивчені процеси перемагнічування в спін-вентильних структурах [5]. 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 [4, 5]. На основі датчиків Холла створені амперметри для вимірювання електричного струму до 100 кА, вимірники лінійних і кутових переміщень, прилади для вимірювання градієнта магнітного поля і магнітного потоку, безконтактні перетворювачі постійного струму в змінний, відтворювачі головок систем звукозапису [4, 6 - 8].

Мета кваліфікаційної роботи бакалавра полягала у вивченні фізичних процесів в чутливих елементах плівкових датчиків Холла та вимірюванні напруги і сталої Холла в одношарових металевих плівкових матеріалах.

Результати роботи представлені і обговорені на Науково-технічній конференції «Фізика, електроніка, електротехніка, ФЕЕ-2021» (м.Суми).

РОЗДІЛ 1 ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ В ЧУТЛИВИХ ЕЛЕМЕНТАХ ДАТЧИКІВ ХОЛЛА

1.1 Ефект Холла

Ефектом Холла називають явище виникнення в металі або напівпровіднику, по якому протікає струм, поперечного електричного поля під дією магнітного поля, лінії індукції \vec{B} якого перпендикулярні до напрямку струму (рис. 1.1а).

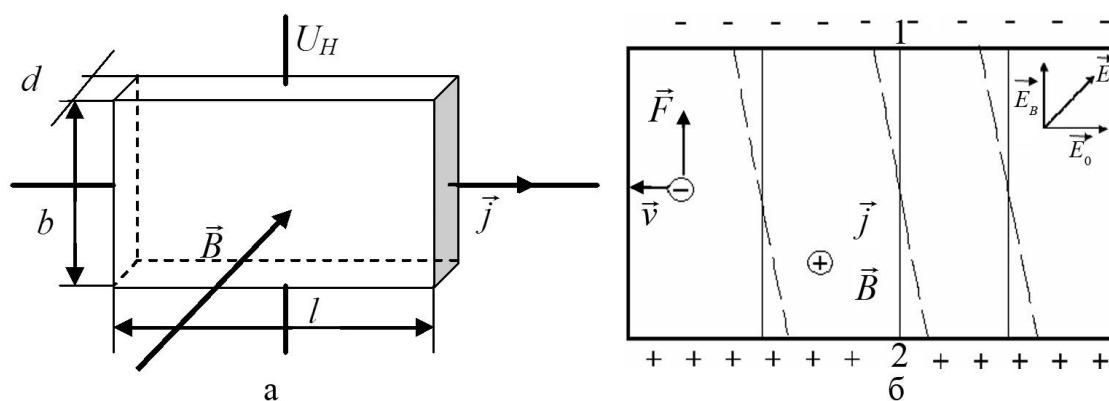


Рис. 1.1. Схема виникнення ефекта Холла. Адаптовано із роботи [10]

Ефект Холла пояснюється електронною теорією провідності. Розглянемо проходження струму через металеву пластину у вигляді паралелепіпеда. При відсутності магнітного поля струм в ній обумовлений лише електричним полем з напруженістю \vec{E}_0 . Оскільки носії заряду – електрони мають від'ємний заряд, їх швидкість напрямленого руху \vec{v} протилежна вектору густини струму \vec{j} .

Еквіпотенціальні поверхні цього поля утворюють систему перпендикулярних до вектора \vec{E}_0 площин (рис. 1.1 б). Потенціал в усіх точках еквіпотенціальної поверхні, а, отже і в точках 1 і 2, однаковий [9, 10]. При

ввімкненні магнітного поля на кожний носій струму починає діяти сила Лоренца \vec{F} , що напрямлена вздовж сторони пластинки b , яка дорівнює

$$F = e\nu B, \quad (1.1)$$

де e – заряд електрону, ν – швидкість руху носіїв заряду, B – модуль вектору індукції магнітного поля.

Внаслідок цього електрони відхиляються від прямолінійної траєкторії до верхнього краю пластини. Біля цього краю утворюється надлишок від'ємних, відповідно біля нижнього краю – надлишок позитивних, зарядів. Отже, виникає додаткове поперечне електричне поле \vec{E}_B . Якщо напруженість цього поля досягне такого значення, що його дія на заряди зрівноважить силу Лоренца, то встановиться стаціонарний розподіл зарядів в поперечному напрямі пластинки. Відповідне значення \vec{E}_B визначається умовою $eE_B = e\nu B$, звідки $E_B = \nu B$. Поля \vec{E}_B та \vec{E}_0 додаються і утворюють результуюче поле з напруженістю \vec{E} , яка тепер буде спрямована під деяким кутом до напрямку проходження струму (рис. 1.1 б). Еквіпотенціальні поверхні завжди перпендикулярні до силових ліній і, отже, до вектора напруженості поля \vec{E} . Тому ці поверхні повернуться і займуть положення, зображене на рис. 1.1 б пунктиром. Точки 1 та 2, що раніше лежали на одній і тій же еквіпотенціальній поверхні, тепер мають різні потенціали. Щоб знайти напругу між цими точками, яка є напругою Холла, треба помножити відстань між ними b на напруженість поля \vec{E}_B .

$$U_H = bE_B = b\nu B. \quad (1.2)$$

Оскільки $j = en\nu$ після підстановки у співвідношення (1.2) отримаємо

$$U_H = bE_B = \frac{1}{en} bjB, \quad (1.3)$$

де j – густина струму, n – концентрація носіїв заряду.

Введемо позначення $R_H = \frac{1}{en}$, тоді рівняння (1.3) можна привести до вигляду:

$$U_H = bE_B = R_H b j B, \quad (1.4)$$

де R_H - стала Холла (СХ).

Для реальних вимірювань використовують дещо іншу форму цього виразу. Врахувавши, що густина струму дорівнює $j = \frac{I}{S} = \frac{I}{bd}$, отримаємо $U_H = R_H B \frac{I}{d}$. З цього співвідношення видно, що вимірявши напругу Холла та знаючи струм, який протікає скрізь пластину можна знайти магнітну індукцію зовнішнього поля. Таким чином, металеві або напівпровідникові пластини і плівки можуть бути використані для детектування магнітного поля.

На відміну від класичного ефекту Холла, який описаний вище, квантовий ефект Холла [11] спостерігається в провідниках, товщина яких надзвичайно мала і її можна порівняти з міжатомними відстанями. У таких провідниках, які називаються двовимірними електронними системами, поступальний рух електрона вздовж осі z неможливий, у зв'язку з чим рух електрона носить двовимірний характер в площині (x, y) . Типовим прикладом двовимірної електронної системи, в якій спостерігається квантовий ефект Холла, є структура метал-діелектрик-напівпровідник (МДН-структура), утворена шарами металу і напівпровідника, розділеними шаром діелектрика (рис. 1.2). Така структура являє собою плоский конденсатор, обкладинками якого є шари металу і напівпровідника. При подачі напруги V_g , між цими обкладинками в приповерхневій області напівпровідника виникає тонкий провідниковий електронний шар (інверсійний канал), що представляє собою двовимірну електронну систему, причому заряд цього електронного шару визначається для конденсаторів виразом:

$$Q = C_0 V_g, \quad (1.5)$$

де C_0 - ємність МДН-структури.

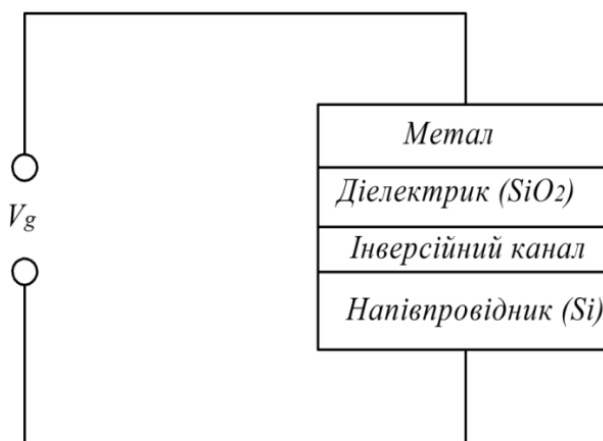


Рис. 1.2. Кремнієва МДН-структура. Із роботи [12]

У разі локалізації електрона в обмеженій області простору закони квантової механіки дозволяють електрону приймати не будь-які значення енергії, а лише ряд строго визначених дискретних значень (частковим наслідком цих законів є наявність дискретного енергетичного спектру електрона в атомі, де рух електрона локалізовано в області простору поблизу атомного ядра завдяки кулонівському притяжінню електрона до ядра). Неважко переконатися в тому, що в разі малої товщини d провідника, рух електрона носить локалізований характер.

Завдяки наявності магнітного поля рух електрона в площині (x, y) відбуватиметься по маючій форму кола циклотронній орбіті і буде обмежений радіусом r цієї окружності, а рух електрона вздовж осі z буде обмежений малою товщиною d двовимірного шару. Таким чином, рух електрона виявляється локалізованим в обмеженій області простору за всіма трьома координатами x , y і z , що призводить до появи дискретного енергетичного спектру. Рішення рівняння Шредінгера для електрона в магнітному полі показує, що радіус циклотронної орбіти:

$$r = \left(\frac{h}{\pi \cdot e \cdot B} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1.6)$$

де h - постійна Планка, а кутова частота обертання електрона по циклотронній орбіті (частота прецесії) $\omega = \frac{e \cdot B}{m}$, де m - маса електрона.

Оскільки обертальний рух електрона носить періодичний осцилюючий характер, то рівні енергії електрона в магнітному полі визначаються добре відомим квантово-механічним виразом для енергії гармонічного осцилятора [13]:

$$E_n = \frac{h \cdot \omega}{2\pi} \left(n + \frac{1}{2} \right), \quad (1.7)$$

де номер енергетичного рівня $n = 0, 1, 2, 3 \dots$, а в ролі частоти коливань осцилятора ω виступає частота прецесії. Енергетичні рівні, схематично зображені на рис. 1.3, називаються рівнями Ландау.

Оскільки площа двовимірного електронного шару в площині (x, y) дорівнює S_0 , то максимальне число електронів, які можуть розміститися в цій площині на даному енергетичному рівні:

$$N_0 = \frac{S_0}{S_e} = \frac{S_0 e B}{h}. \quad (1.8)$$

Рух електронів під дією зовнішнього електричного поля в провідниках якісно можна представити таким чином: завдяки зовнішньому електричному полю, створеному джерелом ЕРС, електрон в провіднику рухається з прискоренням і плавно збільшує свою енергію до тих пір, поки при зіткненні з дефектом кристалічної решітка не втратить придбану енергію, після чого процес плавного прискорення електрона повторюється знову [13].

Такий стрибкоподібний рух електрона характеризується середньою швидкістю впорядкованого руху (дрейфовою швидкістю), яка і визначає силу струму. Таким чином, перебіг струму J вздовж осі x (рис. 1.1, а) нерозривно пов'язаний з можливістю плавного збільшення енергії електрона під дією зовнішнього електричного поля [14].

У разі дискретного енергетичного спектру можливість плавної зміни енергії електрона відсутня, оскільки зміна енергії в цьому випадку при переході електрона з одного рівня Ландау на інший може бути тільки стрибкоподібним. Такої стрибкоподібної зміни енергії електричне поле забезпечити не може, у зв'язку з чим при наявності дискретного енергетичного спектру протікання струму J виявляється неможливим. Однак у реальних двовимірних електронних системах струм J в загальному випадку не дорівнює нулю, і пов'язано це з тим, що при виведенні співвідношення (1.3) для дискретного енергетичного спектра не була врахована можливість розсіювання електрона на дефектах кристалічної решітки (на домішкових атомах, на дислокаціях тощо), які в надлишку присутні в будь-якому реальному твердому тілі.

Нехай електрон рухається по циклотронній орбіті з центром в точці 1, зображеній на рис. 1.3. При зіткненні з розсіюєним центром S електрон перескочить на циклотронну орбіту з центром в точці 2. Таким чином, при наявності розсіювання електрон вже не можна вважати локалізованим в межах однієї циклотронної орбіти: рух електрона в площині (x, y) стає делокалізованим, що відповідно до основних принципів квантової механіки призводить до зникнення дискретного характеру енергетичного спектру.

Аналіз рівняння Шредінгера для електрона в магнітному полі при наявності дефектів кристалічної решітки показує, що завдяки розсіяню електрона дискретні енергетичні рівні перетворюються у вузькі енергетичні смуги. Оскільки в межах розширеного рівня Ландау можлива плавна зміна енергії електрона під

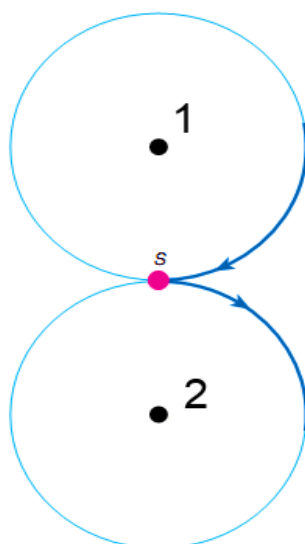


Рис. 1.3. Схема процесу розсіювання електрона на дефекті кристала [15]

дією електричного поля, то стає можливим описаний вище механізм протікання електричного струму вздовж осі x . Таким чином, неодмінною умовою протікання електричного струму вздовж осі x є наявність процесів розсіювання електрона.

Розглядаючи зображений на рис. 1.3 процес розсіювання електрона із стану з центром циклотронної орбіти в точці 1 (стан 1) у стан з центром циклотронної орбіти в точці 2 (стан 2), припускали, що стан 2 не зайнятий іншим електроном (в іншому випадку цей процес розсіювання виявився б неможливий через принципу Паулі, який забороняє двом електронам перебувати в одному стані). Припущення про те, що стан 2 вільний і розсіювання електрона можливе, цілком справедливе для випадку, коли число електронів на рівні Ландау незначне в порівнянні з числом електронів на повністю заповненому рівні Ландау N . У випадку, коли число електронів на рівні Ландау виявляється рівним N_0 , всі стани на даному рівні виявляються зайняті електронами і, незважаючи на наявність розсіюючих центрів, зображених на рис. 1.3 перехід електрона з однієї циклотронної орбіти на іншу в межах одного рівня Ландау є неможливим [15].

Таким чином, величина холлівського опору визначається тільки фундаментальними фізичними постійними: постійною Планка h і зарядом електрона e . Квантовий ефект Холла, з одного боку, є фундаментальним явищем, в якому квантові властивості речовини проявляються в макроскопічних масштабах, а з іншого - має найважливіше прикладне значення в метрології як метод точного визначення фундаментальних фізичних постійних.

Холлівська різниця потенціалів пропорційна напруженості магнітного поля, її можна виміряти за допомогою напівпровідникової пластинки, поміщеної в магнітному полі. Для вимірювання магнітних полів в тонких зазорах краще скористатися не напівпровідникової пластинкою, а тонкою плівкою.

Датчик Холла (рис.1.4) складається з тонкої слюдяною підкладки прямокутної форми, на яку наноситься шар напівпровідника, що володіє відповідними електричними параметрами. На цей шар наносяться чотири металевих електрода, з яких два - струмові. Інша пара електродів призначена для зняття холлівської різниці потенціалів. До електродів підводяться тонкі провідники. Плівка з напівпровідниковим шаром може мати товщину від 10 нм до 100 мк. Дроти від холлівських електродів датчика йдуть до переносного потенціометру. Чутливість датчика коливається в межах 20-100 мкВ / Е. Безінерційність ефекту Холла дає можливість за допомогою датчика вимірювати змінні магнітні поля до частот в 10^{12} Гц. Датчики можуть бути вельми малих розмірів, що дозволяє застосовувати їх для дослідження топографії поля. Подібними датчиками можна вимірювати як дуже малі ($H=10^{-9}$ Тл), так і великі ($H=10$ Тл) поля. Регулюванням сили струму, поточного крізь напівпровідниковий шар, досягається різна чутливість датчика. Остання визначається практично рівнем шумів. Тому в плівкових датчиках досить надійні вимірювання доцільно проводити в полях від 10 мТл і вище.

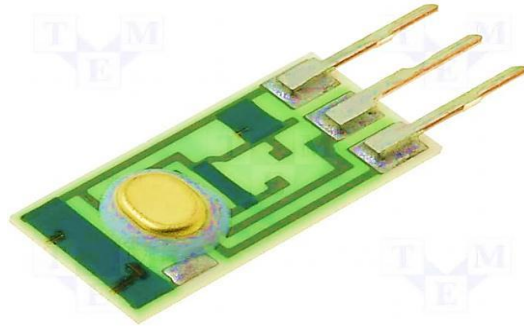


Рис. 1.4. Зовнішній вигляд плівкового датчика Холла [16]

Пристрій з датчиком Холла використовують і для вимірювання напруженості постійного магнітного поля. Такий магнітометр - лише один з варіантів приладу, призначеного для магнітних вимірювань. Ці виміри проводяться далеко не в однакових умовах. Тому магнітометр для вивчення перехідних процесів в електричних машинах повинен бути інакше сконструйований, ніж той же прилад для досліджень, припустимо, кривих намагнічування магнітних матеріалів і т.д. Точно так само різні і умови, пропоновані до самого матеріалу датчика. Вони значною мірою залежать від цілей, для яких призначається вимірювач магнітних полів [16].

Використання ефекту Холла для потреб практики виходить далеко за межі одних лише вимірювань магнітних полів. Датчики Холла, відповідним чином конструктивно оформлені, у яких замість напівпровідникової плівки поміщена полі-або монокристалічна напівпровідникова пластина, можуть вирішувати різні технічні завдання.

1.2 Параметри і характеристики датчиків на основі ефекту Холла

Датчиком Холла називається магнітоелектричний напівпровідниковий прилад, заснований на використанні ефекту Холла (рис.1.5). Напруга, що подається на керуючі електроди U_1 , називається вхідною напругою датчика Холла, а опір R_1 між цими електродами називається вхідним опором.

Величина опору при відсутності магнітного поля визначається за формулою:

$$R_1 = \frac{\rho l}{bd}, \quad (1.10)$$

де ρ - питомий опір напівпровідника.

З ростом напруженості магнітного поля вхідний опір збільшується.

Напруга між двома іншими (холлівськими) контактами називається вихідними і позначається U_2 (рис. 1.6). Опір між холлівськими контактами називається вихідним і позначається R_2 . Величина його за відсутності магнітного поля визначається виразом:

$$R_2 = \frac{\rho b}{ld}. \quad (1.11)$$

Тут не врахована нерівномірність розподілу струму по перетину датчика. На рис. 1.6 наведено сімейство вольт-амперних характеристик датчика для одного і того ж значення вхідного струму та для декількох значень індукції магнітного поля. Із зростанням поля крутість зростає внаслідок того, що зростає внутрішнє опір датчика R_2 . Вихідний опір, так само як і вхідна, із збільшенням магнітного поля зростає [17].

Однією з важливих характеристик датчика, що дозволяє оцінити його ефективність, є коефіцієнт передачі K - відношення вихідної напруги до вхідного при заданому значенні керуючого магнітного поля:

$$K = \frac{U_2}{U_1}.$$

Ураховуючи, що $I_1 = U_1/R_1$, можна знайти коефіцієнт передачі:

$$K = \frac{R_x B_d}{\rho l}.$$

Коефіцієнт передачі зі збільшенням індукції магнітного поля зростає. Зазвичай датчик е.р.с. Холла працює на зовнішнє навантаження.

Схема ввімкнення показана на рис. 1.5. Зовнішня потужність, яка підводиться до датчика від зовнішнього джерела струму дорівнює: $P_1 = \frac{I_1^2 \rho b}{ld}$.

Струм, що протікає по вихідному колу датчика Холла:

$$I = \frac{U_2}{R_2 + R_n},$$

де R_n - опір навантаження.

Вихідна потужність датчика Холла:

$$P_n = I_2^2 R_n = \frac{U_2^2 R_n}{(R_2 + R_n)^2}.$$

При узгодженні вихідного опору і навантаження досягається максимальна вихідна потужність:

$$P_{вих} = \frac{U_2^2}{4R_2} = \frac{U_2^2 ld}{4\rho b} = \frac{R_x^2 I_1^2 B^2 l}{4\rho b d}.$$

Максимальна вихідна потужність обмежується максимально допустимою потужністю розсіювання на датчику. Коефіцієнт корисної дії датчика Холла визначається як відношення потужності, відданої в навантаження $P_{вих}$ до потужності на його вході:

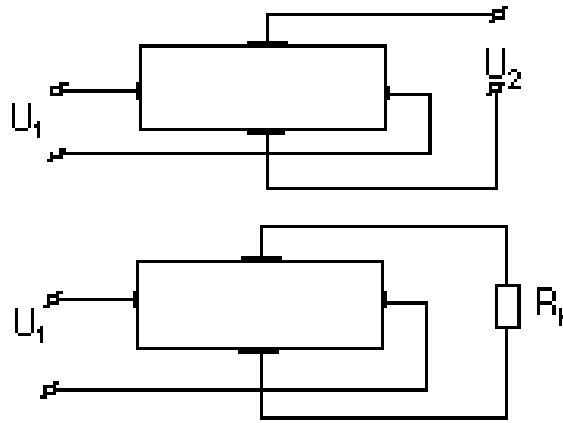


Рис. 1.5. Загальна схема ввімкнення датчика Холла. Із роботи [17]

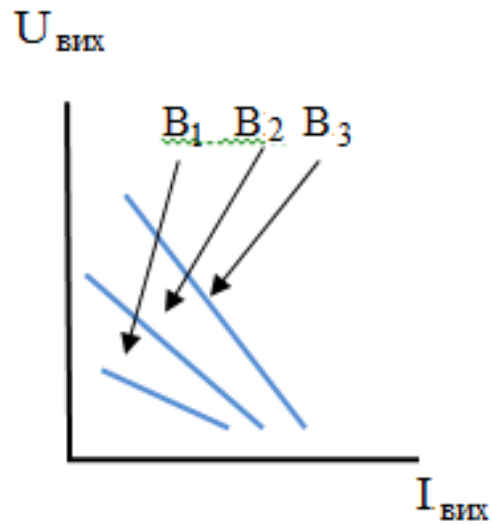


Рис.1.6. Сімейство вольт-амперних характеристик датчика Холла ($B_1 < B_2 < B_3$). Із роботи [18]

$$\eta = \frac{P_{вих}}{P_1} .$$

При погодженому навантаженні ККД датчика дорівнює $\eta = \left(\frac{R_x B l}{2\rho l}\right)^2$ і у реальних датчиках Холла не перевищує величину 20% і не залежить від вхідного струму. Для збільшення е.р.с. Холла і вихідної потужності необхідна збільшувати вхідну потужність.

Важливою характеристикою датчика Холла є чутливість γ . Визначається вона як е.р.с., що виникає на холловських контактах при одиничному керуючому струмі і одиничному значенні магнітної індукції: $\gamma = \frac{U_2}{B I_1} = \frac{R_x}{d}$, $U_2 = \gamma I_1 B$.

Робочим параметром датчика Холла є магнітна чутливість, яка характеризується е.р.с. Холла, що припадає на одиницю магнітної індукції:

$$\gamma_n = \frac{U_2}{B} = \frac{R_x I_1}{d}.$$

У роботі [19] наводяться дані для R_H епітаксіально вирощених плівок ГЦТ-PdFe товщиною 31 нм, авторами показано, що класична стала Холла при $T = 50$ і 270 К складає $(-0,28$ і $-0,16) \cdot 10^{-9}$ м³/Кл, відповідно.

1.3 Технології виготовлення і галузі застосування датчиків Холла

На основі ефекту Холла функціонують сенсори Холла – прилади для вимірювання напруженості магнітного поля, які використовуються у безколекторних електродвигунах (сервомоторах), іонних реактивних двигунах, високочутливих вимірювачах магнітного поля, мікроелектронних компасах, датчиках переміщення і вимірювання частоти обертання [20]. Застосування ефекту Холла дозволяє визначити тип, концентрацію і рухливість носіїв заряду в металі або напівпровіднику, провести аналіз анізотропних процесів на межі поділу систем феромагнетик/антиферомагнетик [21] та провести дослідження процесів перемагнічування в спін-вентильних

структурах. На основі датчиків Холла створені амперметри для вимірювання електричного струму до 100 кА, вимірники лінійних і кутових переміщень, прилади для вимірювання градієнта магнітного поля і магнітного потоку, безконтактні перетворювачі постійного струму в змінний, відтворювачі головок систем звукозапису [5]. Для тонкоплівкових датчиків Холла характерні слабкі залежності опору і коефіцієнта Холла від температури та напруженості магнітного поля, що і визначає їх широке застосування, не дивлячись на низьку ЕРС (див., наприклад, [20, 21]).

Промислові датчики Холла повинні відповідати наступним вимогам:

- високе значення R_H і високе значення е. р. с. Холла в режимі холостого ходу;
- висока провідність при заданому значенні коефіцієнта Холла, коли датчик працює на зовнішнє навантаження, споживчий струм, і частина е.р.с. Холла падає на внутрішньому опорі датчика між електродами Холла, обумовлюючи шкідливі втрати;
- низький температурний коефіцієнт коефіцієнта Холла і провідності.

Матеріал чутливих елементів датчиків Холла повинен мати максимальну рухливість носіїв заряду з мінімальними температурними залежностями рухливості і концентрацій носіїв заряду та невисоку електричну провідність. Для цього ланцюга використовують плівки селеніду і телуриду ртуті, антимоніда індію і тверді розчини цих сполук. Вони мають високу рухливість носіїв заряду навіть в тонких монокристалічних плівках. Тонкоплівкові датчики, отримані методом випаровування з цих матеріалів, володіють слабкою залежністю коефіцієнта Холла і опору від температури і від напруженості магнітного поля, що визначило їх широке застосування, незважаючи на порівняно низьку е. р. с. Холла.

Для виготовлення датчиків Холла застосовують також монокристалічний Ge і Si, леговані миш'яком, фосфором і сурмою. Датчики, виготовлені з цих матеріалів, мають високий коефіцієнт Холла і низький температурний коефіцієнт (особливо кремнієві). Максимальна величина е.р.с. Холла досягає 1В.

Застосовується для виготовлення датчиків Холла антимонід індію, арсенід індію, а також сплав антимоніда індію та ангімоніда галію. Датчики, виготовлені з цих матеріалів, мають сильну залежність опору і СХ від температури і магнітного поля. Це обмежує їх застосування. Видно, що е.р.с. Холла буде тим вище, чим тонше зразок напівпровідника. Тому датчики е.р.с. Холла виготовляють у вигляді пластинок або тонких плівок, тим більше, що з їх допомогою проводиться вимірювання магнітних полів в малих зазорах. Для отримання високого коефіцієнта передачі геометричні розміри необхідно вибирати в співвідношенні $l / b = 2 - 3$.

Напівпровідниковий злиток розрізається на пластини, які за допомогою шліфування доводяться до необхідної товщини. Далі пластини розрізають на прямокутники потрібних розмірів, до яких прилаштовують чотири омичні контакти. Два з них призначені для підведення до датчика напруги від зовнішнього джерела. Вони виконуються по всій ширині пластини, щоб отримати одномірне розподіл вхідного струму по перерізу пластини на всій її довжині. Два інших електрода призначені для реєстрації е. р. с. Холла. Ці контакти повинні бути розташовані строго в одному перерізі, в іншому випадку між ними буде виникати різниця потенціалів і за відсутності магнітного поля за рахунок протікання струму. Враховуючи, що вихідний струм дуже малий, іноді вихідні електроди виконують точковими. З телуриду і селеніду ртуті датчики Холла можуть бути виготовлені також пресуванням порошків при температурі близько 500 К.

Плівкові датчики виготовляють за допомогою нанесення тонких плівок на підкладку методом вакуумного випаровування вихідного матеріалу. Матеріалом підкладки можуть служити слюда, кераміка або інші ізоляційні матеріали. Матеріал підкладки повинен забезпечити гарну адгезію напилюваного матеріалу і мати з ним близький температурний коефіцієнт лінійного розширення. Контакти плівкових датчиків наносять випаровуванням у вакуумі. Для стабілізації параметрів готову плівку протягом декількох годин піддають термостарінню при температурі 100° С. Плівкові датчики тонше

пластинкових. Їх товщина визначається в основному підкладкою. Перевагою їх є високий опір, що зручно при узгодженні з навантаженням.

Отримали розвиток два нових прогресивних методи виготовлення датчиків Холла. Це метод дифузії, домішки я метод епітаксійного вирощування. Обидва ці методи широко застосовують при виготовленні діодів і транзисторів. За допомогою дифузії домішки на матеріалі р-типу утворюється р-п-перехід. На дифузійному п-шарі розміщуються електроди, а р-п-перехід служить ізолюючим шаром. При епітаксійному вирощуванні підкладкою може бути як монокристалічна пластина того ж матеріалу, так і ізоляційні матеріали. Для захисту від механічних і кліматичних впливів виготовлений датчик покривають синтетичною смолою і приклеюють до ізоляційної підкладці або поміщають в бронзовий корпус [18].

На основі ефекту Холла створено ряд приладів і пристроїв, які мають унікальні властивості та займають важливе місце у вимірювальній техніці, автоматиці, радіотехніці та сенсоріці.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

2.1 Фізичні основи функціонування датчиків Холла

Для розробки лабораторного стенду необхідно розглянути фізичні процеси, які відбуваються в чутливих тонкоплівкових елементах датчиків Холла. Розглянемо плівку з однорідного провідника (або напівпровідника), до торців якої припаяно чотири контакти (рис. 2.1). Якщо пластинку помістити в магнітне поле, вектор індукції якого перпендикулярний плівці, то при пропусканні струму I у напрямку 1-2 між контактами 3-4 виникає різниця потенціалів – ефект Холла (див., розділ 1).

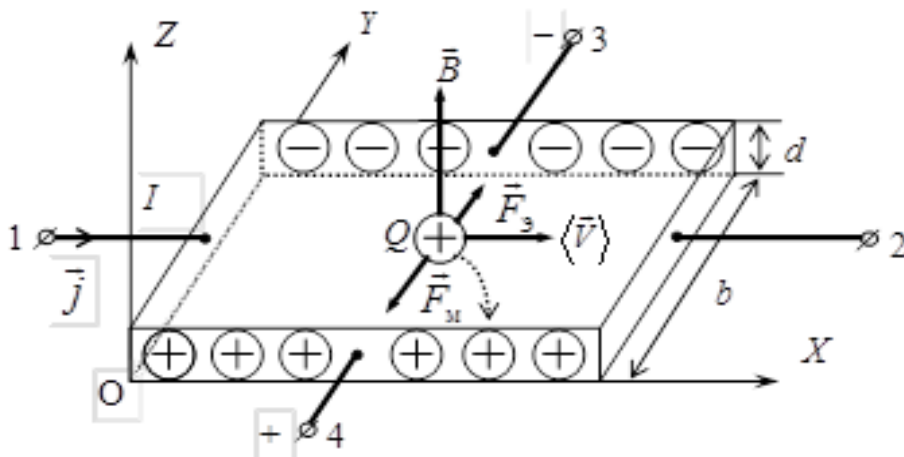


Рис.2.1. Схема для пояснення виникнення ефекту Холла в тонких плівках.
Із роботи [13]

Ефект Холла в плівкових матеріалах можна пояснити наступним чином. Нехай струм I в пластинці обумовлений рухом частинок - носіїв позитивних зарядів Q . Якщо їх концентрація n , а $\langle \vec{v} \rangle$ - середня швидкість їх упорядкованого руху, то сила струму

$$I = JS = Q \langle v_x \rangle n b d , \quad (2.1)$$

де J - щільність струму;

$S = bd$ - площа поперечного перерізу плівки (пластини);

$\langle v_x \rangle$ - проекція вектора $\langle \vec{v} \rangle$ на напрямок вектора \vec{j} (на вісь OX).

На заряджену частку Q , що рухається зі швидкістю \vec{v} в магнітному полі з індукцією \vec{B} , діє магнітна складова сили Лоренца $\vec{F}_M = Q[\vec{v}, \vec{B}]$, яка буде відхиляти заряди до одного з торців плівки (пластини). У результаті на цьому торці виявиться надлишок зарядів, а на протилежному - недолік. З цієї причини в плівці виникає електричне поле, вектор напруженості якого \vec{E} спрямований по осі OY . Сила, що діє на заряд Q з боку цього поля (електрична складова сили Лоренца) $\vec{F}_E = Q \cdot \vec{E}$ буде спрямована протилежно силі \vec{F}_M . Поділ зарядів припиниться, коли середня сила Лоренца, що діє на всі заряди дорівнюватиме нулю, тобто $Q \cdot \vec{E} + Q[\langle \vec{v} \rangle, \vec{B}] = 0$. З цього рівняння знаходимо напруженість усталеного електричного поля: $\vec{E} = -[\langle \vec{v} \rangle, \vec{B}]$.

Спроектуємо вектор напруженості \vec{E} на вісь OY : $E_y = -\langle v_x \rangle \cdot B$, тоді різниця потенціалів між точками 3 і 4 визначиться як

$$\varphi_3 - \varphi_4 = -\int_0^b E_y dy = \langle v_x \rangle B b.$$

Підставляючи замість $\langle v_x \rangle$ її значення з (2.1) і, позначаючи $\varphi_3 - \varphi_4 = U_H$, отримаємо

$$U_H = \frac{I}{Qnd} \cdot B = R_H \cdot \frac{I}{d} \cdot B,$$

де $\frac{1}{Qn} = R_H$ - СХ.

Більш точна теорія, що враховує взаємодію носіїв струму з кристалічною решіткою, дає таке значення постійної Холла:

$$R_H = \frac{r}{Qn},$$

де r - параметр, званий фактором Холла. Він залежить від магнітного поля, температури, властивостей матеріалу зразка і завжди більше одиниці. Наприклад, для германію при кімнатній температурі $r = 3 \pi / 8$. З останньої формули випливає, що знак постійної Холла визначається знаком носіїв заряду. Для металів і напівпровідників з електронною провідністю (n-типу) $R_H < 0$, а для напівпровідників з дірковою провідністю (p-типу) $R_H > 0$.

Холівська напруга лінійно залежить від магнітної індукції B і від протікає в зразку струму I . Якщо досвідченим шляхом отримати ці залежності, то по кутовому коефіцієнту експериментальної прямої k можна визначити СХ.

Дійсно, оскільки $U_H = R_H \cdot \frac{I}{d} \cdot B = k \cdot B$, то величина кутового коефіцієнта

дорівнює $k = R_H \cdot \frac{I}{d}$. Звідси для постійної Холла отримуємо:

$$R_H = k \cdot \frac{d}{I}.$$

Як джерело постійного магнітного поля використовують електромагніт. Величина індукції магнітного поля B в зазорі сердечника електромагніта нелінійно залежить від намагнічує струму $I_{ем}$ в його обмотці. Однак на кривій намагнічування сердечника можна виділити практично лінійна ділянка, для якого буде справедлива формула

$$B = \mu_0 I_{ем} \frac{N}{h},$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн / м - магнітна постійна; N - число витків електромагніту; h - величина повітряного зазору сердечника електромагніта.

При проведенні експерименту завдання вимірювання U_H ускладнюється тим, що контакти 3-4 на зразку (рис. 2.1) можуть бути встановлені з деяким зміщенням відносно один одного. У цьому випадку напруга між ними буде обумовлено не тільки ефектом Холла, а й омичним падінням напруги, внаслідок протікання основного струму через зразок. Тому вимірювання при кожному значенні струму слід проводити для двох протилежних напрямлений вектора індукції магнітного поля. Тоді холлівська напруга буде міняти знак, а омичний напруга буде залишатися постійним. При одному напрямку магнітного поля вимірюється різниця потенціалів

$$U^{\rightarrow} = U_{\text{ом}} - U_H,$$

а при іншому його напрямку

$$U^{\leftarrow} = U_{\text{ом}} + U_H.$$

Виключаючи з цих двох рівнянь невідому величину $U_{\text{ом}}$, отримуємо

$$U_H = \left| \frac{U^{\rightarrow} - U^{\leftarrow}}{2} \right|.$$

2.2 Конструкція і принципова схема лабораторного станду

Для дослідження фізичних характеристик чутливих елементів плівкових датчиків Холла був виготовлений лабораторний станд, зовнішній вигляд і електрична схема якого наведені на рис.2.2, 2.3 і 2.4 відповідно. Для конструювання лабораторного станда використовувались джерело постійної напруги, електромагніт, мультиметри, регульований блок живлення з робочою напругою від 0 до 15 В.

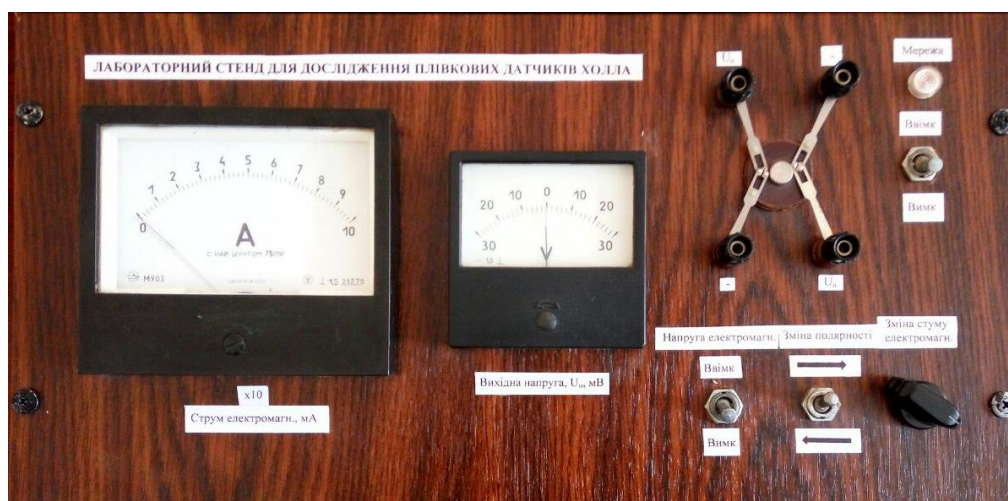


Рис. 2.2. Зовнішній вигляд лабораторного стенда

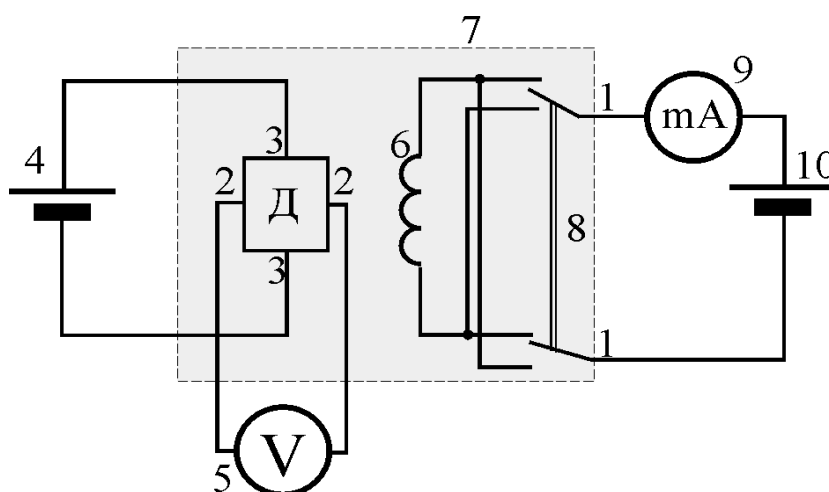


Рис. 2.3. Принципова схема лабораторного стенду:

- (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»

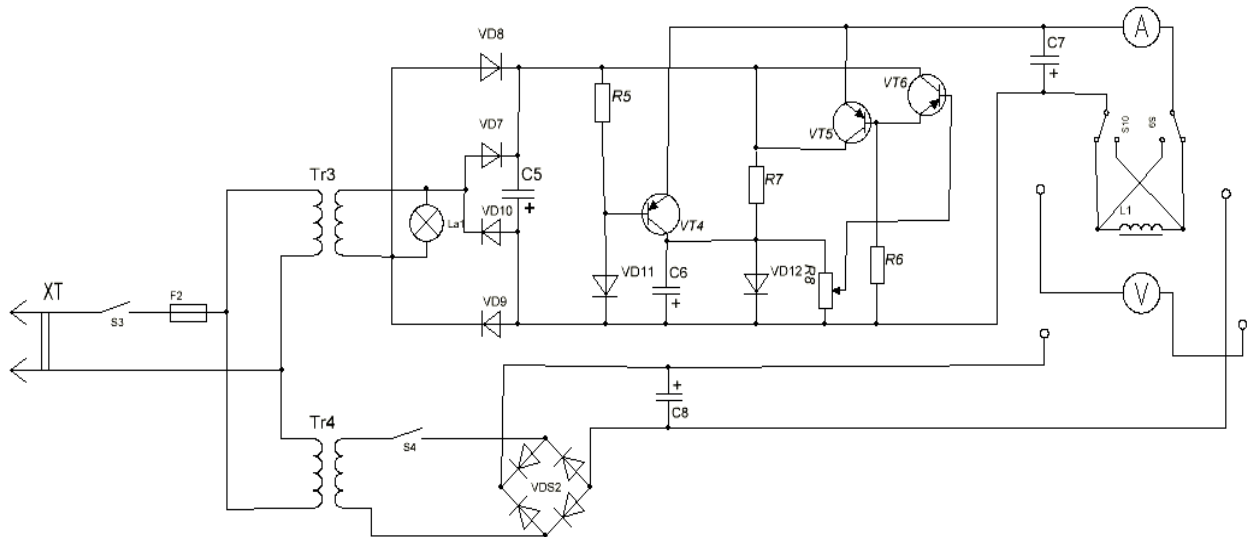


Рис. 2.4. Електрична схема лабораторного стенду

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 напрузі «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.

2.3 Результати вимірювань

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 створені 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.

Величина СХ металів залежить від зонної структури та форми поверхні Фермі. В області власної провідності знак ЕРС Холла відповідає знаку носіїв із більшою рухливістю. Якщо експериментальні вимірювання вказують на від'ємне значення напруги Холла, то це свідчить про переважання електронної провідності у зразку. Надалі величину R_H ми будемо розглядати по модулю.

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. Крім цього слід відмітити, що у феромагнітних шарах на електрони провідності діє не тільки зовнішнє, але і внутрішнє магнітне поле.

З використанням лабораторного стенду проведені вимірювання сталої Холла (R_H) в одношарових плівках Fe, Cu, Cr і Al товщиною $d \cong 40$ нм, величина якої по модулю складала: $(5,1; 0,9; 3,8; 0,7) \cdot 10^{-10}$ м³/К відповідно. Розрахунок концентрації електронів у плівках різних металів однакової товщини проводився на основі співвідношення

$$R_H = 1/(ne),$$

де n – концентрація електронів; e – заряд електрона.

Отримано, що концентрація електронів змінюється від $(1,2-1,6) \cdot 10^{28}$ м⁻³ (Fe і Cr) до $(7,0-8,9) \cdot 10^{28}$ м⁻³ (Cu і Al), що підтверджується більш високою

електронною провідністю Cu і Al у порівнянні з Fe і Cr. Результати вимірювань наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Експериментальна величина сталої Холла і розрахункове значення концентрації електронів в одношарових металевих плівках

Плівка (товщина в нм)	Стала Холла R_H , 10^{-10} , м ³ /Кл	Концентрація електронів n , 10^{28} , м ⁻³
Fe (40)/П	5,1	1,2
Cr (40)/П	3,8	1,6
Cu (40)/П	0,9	7,0
Al(40)/П	0,7	8,9

ВИСНОВКИ

1. У ході виконання кваліфікаційної роботи бакалавра вивчені питання стосовно фізичних принципів функціонування, конструкції та галузей застосування ефекту Холла.

2. Розглянуто технологічні особливості датчиків Холла, типова конструкція яких складається з тонкої слюдяною підкладки прямокутної форми, на яку наноситься шар напівпровідника товщиною від 10 нм до 100 мкм з певними електричними параметрами. На плівку напівпровідника наносяться чотири металевих електрода, з яких два – струмові, два – призначені для контролю напруги Холла. Безінерційність ефекту Холла дає можливість за допомогою датчика вимірювати змінні магнітні поля до частот в 10^{12} Гц.

3. Показано, що на основі ефекту Холла функціонують прилади для вимірювання напруженості магнітного поля, які використовуються у безколекторних електродвигунах (сервомоторах), іонних реактивних

двигунах, високочутливих вимірювачах магнітного поля, мікроелектронних компасах, датчиках переміщення і вимірювання частоти обертання. Застосування ефекту Холла дозволяє визначити тип, концентрацію і рухливість носіїв заряду в металі або напівпровіднику, провести аналіз анізотропних процесів на межі поділу систем феромагнетик/антиферомагнетик та процесів перемагнічування в спін-вентильних структурах.

4. Освоєна методика вимірювання ефекту Холла в плівкових матеріалах з використанням лабораторного стенду. Проведені вимірювання сталої Холла в одношарових металевих плівках Fe, Cr, Cu, і Al товщиною $d \cong 40$ нм. Установлено, що її величина по модулю складала: $(5,1; 3,8; 0,9; 0,7) \cdot 10^{-10}$ м³/К відповідно.

5. Проведена розрахункова оцінка концентрації електронів у плівках різних металів однакової товщини. Отримано, що концентрація електронів змінюється від $(1,2-1,6) \cdot 10^{28}$ м⁻³ (Fe і Cr) до $(7,0-8,9) \cdot 10^{28}$ м⁻³ (Cu і Al), що підтверджується більш високою електронною провідністю Cu і Al у порівнянні з Fe і Cr.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Проценко І.Ю., Шумакова Н.І. Датчики неелектричних величин: навч. посібник. – Суми : СумДУ, 2003. – 79 с.
2. Ефект Холла в мультишарах на основі Pd і Fe / О.С. Гришук, Т.П. Говорун, Л.В. Однедворець, О.П. Ткач // Ж. нано- електрон. фіз. – Т. 3, №4, 2011. – С. 131-137.
3. 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.
4. Крилик Л.В., Селецька О.О. Матеріали електронної техніки: навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2017. – 120 с.
5. Кучис Е. В. Гальваномагнитные эффекты и методы их исследования / Е. В. Кучис. – Москва: Радио и связь, 1990. – 286 с.
6. Mulenko S. A. Synthesis of nanometric iron oxide films by RPLD and LCVD for thermo-photo sensors / S. A. Mulenko, N. T. Gorbachuk // Applied Physics B: Lasers and Optics. – V.105, №3. - 2011. - P.523 - 532.
7. 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.
8. Magnetoresistance and Hall effect in epitaxial Co-Au superlattices / W.Vavra, C.H. Lee, F.J. Lamelas, H. He, R.Clarke, C. Uher //Phys.Rev.B. – 1990. –V.42, №7.– P.4889 – 4892.
9. Mi W.B. Enhanced Hall effect in Fe_xGe_{1-x} nanocomposite films / W.B Mi., Y.W.Liu, E.Y. Jiang, H.L. Bai // J. Appl. Phys. – 2008. – V. 103. – P. 093713-1 – 093713-8.
10. Аш Ж. К. Датчики измерительных систем. – Москва: Мир, 1992. – 480 с.
11. Котюк А. Ф. Датчики в современных измерениях. Массовая радиобиблиотека / А. Ф. Котюк. – Москва: Телеком, 2006. – 96 с.

12. Матеріали і компоненти функціональної електроніки: навчальний посібник (електронне видання) / Л.В. Однодворець, І.М. Пазуха. – Суми: Сумський державний університет, 2020. – 196 с.
13. Трунов О. М. Датчики та сенсори робототехнічних систем. – 2020. – Миколаїв: ЧНУ. – 39 с.
14. 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.
15. Джексон Р.Г. Новейшие датчики. – Москва: Техносфера, 2017. – 384 с.
16. Матвієнко М.П. Основи електроніки: підручник. – Київ: Видавництво Ліра-К, 2017. – 364 с.
17. Матвійків М.Д., Когут В.М., Матвійків О.В. Елементна база електронних апаратів. – Львів: Вид-во НТУ «Львівська політехніка», 2018. – 428 с.
18. Seemann K.M. 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 / K.M. Seemann, Y. Mokrousov, A. Aziz et al. // *Phys. Rev. Lett.* – 2010. – V. 104. – P. 076402-1 – 076402-4.
19. Ogrin F.G. 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.
20. 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, електроніки, електротехніка. ФЕЕ-2021». – 2021. – С. 76.