

Власник документу:
Бевза Олег Миколайович

ID перевірки:
1004063764

Дата перевірки:
16.06.2020 03:15:15 EEST

Тип перевірки:
Doc vs Internet + Library

Дата звіту:
16.06.2020 03:24:13 EEST

ID користувача:
90740

Назва документу: 2020-bachelor-EDD_Serhiychuk_Mahnitometr_fch

ID файлу: 1004076730 Кількість сторінок: 25 Кількість слів: 9025 Кількість символів: 66148 Розмір файлу: 96.88 KB

6.44% Схожість

Найбільша схожість: 4.19% з джерело <https://ua.in.ua/hrafen-prystrij-i-zastosuvannia-osoblyvosti-ta-perspektyvy.html>

5.76% Схожість з Інтернет джерелами 17 Page 27

0.86% Текстові збіги по Бібліотеці акаунту 11 Page 27

1.04% Цитат

Цитати 2 Page 28

Вилучення переліку посилань вимкнено

0% Вилучень

Вилучений текст відсутній

Підміна символів

Заміна символів 45

Віктору Сергійчуку

Магнітометр на основі сенсора Холла із активною фоточутливою областю**АНОТАЦІЯ**

У даній дипломній роботі було виконано дослідження сенсора Холла з активною фоточутливою областю та розробку магнітометру на його основі. В роботі представлені як теоретичні відомості, так і результати практичних досліджень з розрахунками параметрів сенсора та спроектованого магнітометра.

В дипломному проєкті представлено огляд науково-технічної літератури стосовно ефекту Холла у кристалах напівпровідників, матеріалів, що підходять для виготовлення сенсорів Холла. Приведені експериментальні результати дослідження фотопровідності активної області кристалу CdS разом з теоретичним обґрунтуванням процесів, які в ньому протікають.

Приведені розрахунки параметрів спроектованого магнітометру, результати інженерного розрахунку підсилювача для реєстрації напруги Холла, який має коефіцієнт шуму до 3 дБ. Отримані експериментальні результати відрізняються від теоретичних менше ніж на 5 %. Розроблена структурна, функціональна та електрична принципова схеми магнітометру на основі сенсора Холла. В експериментальній частині роботи наведено розрахунок параметрів магнітометра.

ANNOTATION

In this graduate work research and development of a magnetometer based on a Hall sensor with an active photosensitive area. The work presents both theoretical information and the results of practical research with calculations of the parameters of the sensor and the designed magnetometer.

The diploma project presents a review of the scientific and technical literature on the Hall effect in semiconductor crystals, materials suitable for the manufacture of Hall sensors. The results of circuit design for experimental observation of the Hall effect are shown, the waveforms after passing through a semiconductor crystal are given.

The results of calculation of parameters of the designed magnetometer, results of engineering calculation of the amplifier for registration of Hall voltage which has low noise factor are resulted. The results of experimental tests differ from the theoretical values by less than 5%. A structural, functional and electrical schematic diagram of a magnetometer based on a Hall sensor and a low-noise amplifier has been developed. The experimental section shows the calculation of the parameters of the magnetometer.

ВСТУП

Перша згадка про вимірювальний прилад під назвою магнітометр датується 1833 роком. Ефект Холла також має давню історію, оскільки був відкритий у 1879 році. Реальне використання компонентної бази, на основі ефекту Холла, для створення магнітометрів (тесламетрів, гауссметрів) почалось значно пізніше, а саме після розробки технологій отримання напівпровідникових матеріалів, які мають значну рухливість та час життя

носіїв заряду. До цих матеріалів відносять германій Ge, кремній Si, антимонід та арсенід індію InSb та InAs, арсенід-фосфід індію InAsP, арсенід галію GaAs, селенід та телурид ртуті HgSe та HgTe. За останні роки в технологічних лабораторіях було розроблено декілька нових матеріалів, наприклад, кадмій-ртуть-телур CdHgTe, арсенід кадмію Cd_3As_2 , які можуть бути придатними для виготовлення сенсорів Холла.

Вимірювання параметрів магнітного поля, а також магнітних властивостей матеріалів широко використовуються в багатьох галузях науки і техніки. Існує величезна різноманітність магнітометрів: векторні (вимірюють вектор магнітного поля) і скалярні (вимірюють модуль магнітного поля). Векторні магнітометри широко поширені в задачах дистанційного неруйнівного контролю магнітних виробів, пошуку корисних копалин, дефектоскопії, медицині тощо. У більшості випадків, сенсор такого магнітометра складається з трьох магніто-чутливих перетворювачів. Кожен з перетворювачів вимірює проекцію індукції магнітного поля на свою чутливу вісь. В якості таких перетворювачів можуть застосовуватися ферозонди, холлівських перетворювачі, тунельні магніторезистори і т.д. Скалярні або абсолютні магнітометри володіють, як правило, більшою точністю вимірювань [14].

Серед всіх магнітометричних пристроїв найбільшою чутливістю, яка сягає 10^{-17} Тл, володіють SQUID (superconducting quantum interference device) магнітометри [15], а найбільшою абсолютною точністю – протонні магнітометри і квантові магнітометри з оптичним методом накачки і вимірювання параметрів магнітного поля [16].

В залежності від призначення та діапазону вимірювання напруженості (індукції) магнітного поля підбирається сенсор Холла з відповідного матеріалу та конструкції. На сьогодні не відомий матеріал, який би можна було використати у серійних сенсорах Холла для вимірювання сильних (понад 3 Тл) та надмалих (до 10^{-17} Тл) магнітних полів. Це зумовлено нелінійністю характеристик і параметрами самих матеріалів.

Для досягнення мети дипломного проекту необхідно виконати наступні **завдання дипломної роботи**: розробка сенсора Холла на основі фотопровідних напівпровідників. Дослідження чутливості сенсора Холла в залежності від інтенсивності опромінення його активної зони. Для виконання поставленого завдання необхідно:

- Спроектувати та дослідити сенсор Холла на основі фотопровідного монокристалу CdS (вхідна напруга 10-25 В, габарити 4x4 мм, товщина 0,5 мм);
- Використовуючи нановольтметр з чутливістю 10нВ і граничною чутливістю 1 нВ провести серію вимірювань індукції магнітного поля в діапазоні 500-1 мТл з використанням розробленого сенсора Холла;
- Опромінюючи активну зону розробленого сенсора Холла лазерним випромінюванням з довжиною хвилі 500 нм і потужністю 100 мВт провести серію вимірювань індукції магнітного поля в діапазоні 500-1 мТл.

Мета дипломного проекту: розробка функціональної схеми магнітометра на основі виготовленого сенсора Холла, а також проектування та розрахунок для нього малошумлячого підсилювача з коефіцієнтом підсилення до 10^4 , часом реакції до 30 с, коефіцієнтом шуму до 3дБ.

1 ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1.1 Основи ефекту Холла

Ефект Холла відноситься до гальваномагнітних ефектів, тобто такий, що виникає у провіднику першого роду при одночасній дії на нього електричного та магнітного полів. Суть гальваномагнітного ефекту Холла можна пояснити наступним чином [1]: якщо через відносно довгу пластину ($l \gg b$), виготовлену з напівпровідника, наприклад, з n -провідністю, поміщену в магнітне поле (рис.1.1), пропустити в напрямі осі X електричний струм I , то на кожен електрон, який рухається всередині пластини, діє сила Лоренца. Якщо вектор магнітної індукції B напрямлений по нормалі до площі пластини, тобто напрямлений вздовж осі Z , то сила Лоренца рівна:

де e_0 – заряд електрона; v – середня швидкість руху носіїв заряду в напрямі ліній струму.

Рис. 1.1. Принцип дії гальваномагнітного перетворювача Холла

Гальваномагнітні ефекти найкраще виражені у напівпровідниках лише з електронною або лише дірковою провідністю (германій, кремній, вісмут, арсенід індію, арсенід галію, селенід ртуті, арсенід кадмію тощо), тому саме з них і виготовляють гальваномагнітні перетворювачі.

Під дією цієї сили електрони будуть відхилятися до однієї з поздовжніх граней пластини, в результаті чого їх концентрація збільшиться, а на протилежній грані – зменшиться. Це призводить до просторового розділення зарядів і появи різниці потенціалів між гранями, а тому до виникнення поперечної складової напруженості електричного E_y поля, яку називають напруженістю Холла. В результаті на електрон починає діяти, крім сили Лоренца, сила електричної взаємодії, яку можна визначити як:

Накопичення зарядів на поздовжніх гранях пластини буде продовжуватися доти, доки дія електричного поля Холла на заряди не буде урівноважена дією сили Лоренца. Умова рівноваги буде мати вигляд:

Оскільки струм I , який протікає через прямокутну пластину поперечного перерізу $b \cdot d$, пов'язаний із середньою швидкістю носіїв заряду співвідношенням:

тоді вираз для E_y можна записати у вигляді:

звідки ЕРС Холла:

де R_H – коефіцієнт Холла, який залежить від природи матеріалу чутливого елемента; n – концентрація електронів в одиниці об'єму.

Теоретично функція перетворення, тобто залежність ЕРС Холла від індукції при заданій силі струму, є лінійною лише для ідеального напівпровідника, безмежно довгого в напрямі осі X і при обмежених значеннях магнітної індукції B . Практично лінійною можна вважати функцію перетворення такого сенсора, для якого відношення довжини до ширини

більше, ніж 2..3 і верхня межа діапазону перетворення за індукцією не перевищує 1..5 Тл.

ЕРС Холла може бути постійною або змінною, залежно від того, в якому полі розміщений сенсор і до якого живлення він підключений. Якщо індукція досліджуваного поля та струм живлення постійні, то ЕРС Холла також постійна. В інших випадках вона змінна і тої самої частоти, що і частота вхідної змінної величини.

У напівпровідниках з р-провідністю коефіцієнт Холла $\frac{1}{e_0 p}$, де p – концентрація дірок [1].

Насправді, елементарне виведення коефіцієнта Холла неточне: в ньому не враховано різницю між миттєвою швидкістю електронів, що входять у вираз магнітної складової сили Лоренца, і дрейфовою швидкістю, якої електрон набуває під дією електричного поля. Крім того, не враховано розподіл електронів за швидкостями та механізми розсіювання носіїв. Вираз справедливий лише для металів та вироджених напівпровідників (електронно-дірковий газ в них не описується за допомогою класичної статистики).

Рівняння не може одночасно виконуватися для всіх електронів або дірок, які мають різні за величиною та напрямом швидкості. Тому стаціонарний стан насправді настає тоді, коли струм, створений холівським електричним полем, компенсує струм, створений дією сили Лоренца. Більш суворий аналіз дає для невироджених напівпровідників значення коефіцієнта Холла R , яке відрізняється від виразу на множник A , який має порядок одиниці. Наприклад, якщо враховувати розсіювання носіїв лише на кристалічній ґратці (взаємодія з фононами), то $A = \frac{3\pi}{8}$. В загальному вигляді коефіцієнта Холла може бути записаний у вигляді:

Де значення множника A лежить в межах 1...1,7. Різні знаки у формулах демонструють, що ЕРС Холла для електронного та діркового напівпровідників мають протилежні полярності [6].

Часто використовують вираз для коефіцієнта Холла, записаного через рухливість носіїв заряду, яка рівна відношенню швидкості напрямленого руху носіїв заряду до напруженості зовнішнього електричного поля, що викликало цей рух:

Враховуючи зв'язок напруженості E_x зі струмом I через пластину, з геометричними розмірами та питомим електричним опором, маємо:

Тоді вираз для ЕРС Холла приймає вигляд:

Константа Холла:

Як видно з формули, константа Холла прямо-пропорційно залежить від рухливості. Також важливою є її залежність від різниці рухливостей основних та неосновних носіїв зарядів у напівпровіднику.

Якщо гальваномагнітний перетворювач підключено до джерела напруги, а не струму, то виражаючи струм через прикладену напругу,

питомий електричний опір та площу поперечного перерізу пластини, отримуємо:

Отже, ЕРС Холла пропорційна рухливості носіїв заряду та добутку магнітної індукції поля і прикладеної напруги [1].

Знання електропровідності та постійної Холла дозволяє знайти як концентрацію носіїв, так і їх рухливість. Якщо позначити через холівський кут малий кут, який утворює з віссю X вектор напруженості сумарного електричного поля (див.рис. 1.2.):

Рис. 1.2. Зміщення основних носіїв заряду в дірковому (а) та електронному (б) напівпровідниках. В обох випадках показано холівський кут, який утворює з віссю X вектор напруженості сумарного електричного поля.

Після встановлення рівноваги вектор j буде спрямований вздовж поля E_0 , проте сумарне поле буде повернуто на деякий кут φ_H відносно j . Знак кута визначається напрямом поля Холла: позитивний для діркового напівпровідника і від'ємний для електронного. Еквіпотенційні поверхні будуть повернуті на цей кут відносно початкового положення, тому у зразку з'явиться ЕРС Холла, яка зростає зі збільшенням сили струму та індукції магнітного поля.

Для холівського кута можна записати:

де θ_H – холівський кут у n -напівпровіднику, а μ_{aH} – так звана «холівська рухливість» електронів (індекс H вказує на метод визначення рухливості).

Чисельне значення холівської рухливості може розрізнятися зі значеннями рухливостей, отриманих іншими методами, наприклад, прямим способом, заснованим на вимірюванні часу поширення носіїв заряду у напівпровіднику на певну відстань у відомому прискорюючому полі.

Сумісне вимірювання провідності та ефекту Холла дозволяє визначити концентрацію основних носіїв заряду та їх холівську рухливість. Тому ефект Холла є одним з найважливіших методів дослідження напівпровідників. Якщо відомий механізм розсіювання, то за виміряним значенням холівської рухливості можна знайти дрейфову рухливість. Рухливість дірки та електрона є однією з основних характеристик напівпровідника, за якою можна судити про ступінь чистоти матеріалу напівпровідників.

Визначена таким способом рухливість називається дрейфовою. Її можна визначити в такому вигляді:

де індекс d вказує на дрейфову рухливість електронів.

Порівнюючи холівську та дрейфову рухливості, отримуємо, що для електронів:

Відповідно для дірок:

Тоді можна отримати:

Наведений вираз відноситься до напівпровідників, у яких концентрація неосновних носіїв мала, порівняно з концентрацією основних (тобто до матеріалів з уніполярною провідністю). Розрахунок постійної Холла для напівпровідника зі змішаною провідністю призводить до формули [6]:

Тоді для ЕРС Холла:

Розглянемо три можливі випадки:

1. Електронний напівпровідник

2. Дірковий напівпровідник [5]

3. Для власного напівпровідника (при $n = p = n_i$) маємо:

У власних напівпровідників постійна Холла зазвичай від'ємна, оскільки рухливість електронів частіше вища за рухливість дірок (через більшу ефективну масу дірок). На рисунку 1.3 показані залежності рухливості електронів та дірок від концентрації домішок у найбільш поширених напівпровідниках.

Якщо рухливості дірок та електронів однакові, то постійна Холла дорівнює нулю і ефект Холла відсутній (справедливо для власного напівпровідника) [6].

Рис. 1.3. Залежність дрейфової рухливості електронів та дірок в Si та Ge та холівської рухливості в арсеніді галію (GaAs) від концентрації атомів легуючої домішки (при $T=300$ К)

1.2 Ефект Холла у слабких магнітних полях

Під слабким магнітним полем розуміють таке поле, у якому довжина вільного пробігу зарядженої частинки (електрона чи дірки) значно менша за її кругову траєкторію. У такому полі носій заряду встигає пройти до зіткнення малу дистанцію по круговій орбіті [5].

Якщо оперувати поняттями періоду обертання за круговою орбітою T_c та час релаксації τ – середній час, який в системі існує нерівноважний розподіл носіїв заряду після зняття зовнішніх полів, то для слабого магнітного поля повинна виконуватися умова:

Частота обертання за круговою орбітою носія заряду з ефективною масою m^* у магнітному полі з індукцією B , тобто циклотронна частота ω_c визначається з рівності відцентрової сили та сили Лоренца і рівна:

Тому у слабких полях:

де μ – рухливість (електрона або дірки, яка чисельно рівна дрейфовій швидкості, якої набувають носії заряду в електричному полі одиничної напруженості).

Таким чином умова слабого та сильного магнітних полів визначається не лише індукцією магнітного поля, а й рухливістю носіїв заряду.

Нехай напівпровідник має форму паралелепіпеда і зовнішнє електричне поле спрямоване вздовж осі X ($X, 0, 0$). Під дією поля буде протікати струм із щільністю:

де $\sigma = en\mu_n + ep\mu_p$ – питома електропровідність зразка.

Якщо помістити напівпровідник в магнітне поле, спрямоване вздовж осі Z ($0, 0, B$), тобто перпендикулярно вектору струму, то на носії заряду, що рухаються з дрейфовою швидкістю v_d , буде діяти сила Лоренца:

Яка перпендикулярна руху носіїв заряду та напрямку магнітного поля. Але дрейфову швидкість можна показати через рухливості:

де $\langle \tau \rangle$ – середнє значення релаксації. Плюс відповідає дірці, мінус – електрону. Через це силу Лоренца можна записати так:

Отже, сила Лоренца не залежить від знаку носіїв заряду, а визначається лише напрямом електричного та магнітного полів (напрямок сили визначається за правилом «лівої руки»). Напрямок поля Холла у зразку залежить від знаку носіїв заряду, тому за знаком поля Холла можна визначити тип основних носіїв у напівпровіднику [5].

1.3 Ефект Холла у сильних магнітних полях

Під сильним магнітним полем розуміють поле, в якому довжина вільного пробігу частинки значно більша за радіус її кругової траєкторії, або:

Нехай також виконується умова $\hbar\omega_c \ll kT$, тобто магнітне поле буде настільки сильним, щоб порушувати класичний рух зарядженої частинки. В цьому випадку можна не враховувати зміну енергетичного спектру носіїв через розмірні ефекти.

В класичному сильному магнітному полі характер руху носіїв заряду суттєво змінюється: в проміжку між зіткненнями вони вже не рухаються по майже лінійним траєкторіям як у випадку слабких магнітних полів), а проходять ряд циклів або гвинтової лінії, чи циклоїди або навіть ще складнішої траєкторії.

Розглядаючи рух носіїв заряду в класичному сильному полі можна показати, що замість часу релаксації з'являється «ефективний» час релаксації:

Видно, що у слабкому полі $\tau_{\text{еф}} \approx \tau$, а в класичному сильному полі $\tau_{\text{еф}} \ll \tau$ і в першому наближенні перестає залежати від швидкості руху носіїв заряду, а це означає, що $A=1$. Таким чином, для постійної Холла та холлівської рухливості виходить, що:

Вимірювання ефекту Холла в різних за силою магнітних полях дає можливість визначити Холл-фактор; для цього знаходять відношення постійних Холла, отриманих для одного і того ж зразка в слабкому та сильному полях. В поєднанні з методом термо-ЕРС можна визначити ефективну щільність станів у відповідних зонах.

1.4 Конструкція та розміри сенсорів Холла

Конструктивне виконання та геометричні розміри сенсорів Холла можуть бути різними. Частіше за все вони виготовляються у формі плоскої чотирикутної пластини, до поперечних граней якої прикріплені суцільні електроди, які слугують для підведення струму. До центрів поздовжніх граней прикріплені так звані «холлівські електроди», виготовлені у вигляді точкових контактів [1].

На рис. 1.4 наведені символи перетворювачів Холла та деякі їх конструктивні форми, а в табл. 1.1. приведені характеристики деяких перетворювачів Холла.

Рис. 1.4. Позначення та деякі різновиди конструктивних форм перетворювачів Холла

Таблиця 1.1

Основні характеристики деяких типів сенсорів Холла

На рис. 1.4 та 1.5 показано кілька способів використання елементів Холла в безконтактних перетворювачах положення (позиції). Перетворювачі рис. 3,а мають два можливих напрями зміни положення. В обох випадках

функція перетворення, тобто $e_h=f(d)$ при $x=const$ та $e_h=\varphi(x)$ при $d=const$, є нелінійними. Тому такі сенсори здебільшого застосовують в сигналізаторах граничного положення.

Перетворювачі малих переміщень можуть бути виконані з використанням одного сенсора Холла або диференційно увімкнених двох сенсорів Холла. В таких перетворювачах в якості робочої використовується лінійна ділянка функції перетворення.

Рис. 1.5. Структурні схеми та функції перетворення сенсорів лінійних та кутових переміщень

На рис. 1.6., а та б наведено структурні схеми та функції перетворення відповідно безконтактного сигналізатора положення (перетворювач малих переміщень), а також лічильника обертів (кута відхилення) з використанням додаткового феромагнітного тіла [1].

Рис. 1.6. Структурні схеми та функції перетворення сенсорів лінійних та кутових переміщень з додатковим феромагнітним тілом

1.5 Залежність ефекту Холла від температури

Оскільки n та p є функціями температури, то і постійна Холла залежить від температури. Розглянемо температурну залежність постійної Холла (див.рис.1.7.). В домішковій області вона безпосередньо відтворює залежність $\frac{1}{n}$ (або $\frac{1}{p}$) зі всіма висновками щодо визначення відповідних величин. В області власної провідності коефіцієнт Холла також зворотно пропорційний концентрації носіїв заряду. В перехідній області для аналізу залежності слід скористатися виразом [5]:

Рис. 1.7. Залежність постійної Холла від зворотної температури (для антимоніду індію)

Різні види кривих R_H^n, R_H^p обумовлені залежністю поля Холла та знаку коефіцієнта Холла від типу носіїв заряду. Для дірок знак Холла додатний, для електронів – від’ємний. В області власної провідності знак коефіцієнта Холла визначається носіями з більшою рухливістю. Таким чином, при $b>1$ (рухливість електронів вища за рухливість дірок) для напівпровідника n -типу в будь-якому випадку коефіцієнт Холла від’ємний, а для p -типу перехід від домішкової до власної провідності супроводжується зміною знаку коефіцієнта Холла.

Магнітне поле призводить не лише до появи поля Холла, але і впливає на величину електропровідності. Справа в тому, що поле Холла компенсує дію магнітного поля в середньому, як наче всі носії заряду рухалися б з однією дрейфовою швидкістю. Однак, через розкид частинок за швидкостями повільні відхиляються в одну сторону, швидкі – в іншу, через це зменшується довжина вільного пробігу обох видів частинок в напрямі поля. Це призводить до збільшення опору (магніторезистивний ефект).

При вимірюваннях в сумарну напругу крім ЕРС Холла можуть вносити вклад інші гальвано- та термомагнітні ефекти. До них відносять:

-ЕРС нееквіпотенційності, яка виникає через несиметричність розташування зондів Холла;

-ЕРС Еттингсхаузена – термо ЕРС, яка пов’язана з різницею температур на холівських гранях зразка. Виникає через те, що носії зі швидкістю,

відмінною від середньої, у схрещених полях відхиляються до холівських граней. Швидкі носії віддають енергію (нагрівають решітку), а повільні поповнюють свою енергію (охолоджують іншу грань);

-ЕРС Нернста, що відрізняється від попередньої тим, що потік носіїв зумовлений тепловим полем, причому носії, що рухаються від «гарячого» електрода до «холодного» мають більшу енергію, порівняно з носіями, які рухаються у зворотній бік;

-ЕРС Рігі-Ледюка, яка відрізняється від ЕРС Еттингсхаузена тим, що в даному випадку мається на увазі термомагнітний ефект – аналог ефекту Холла, в якому поздовжнє температурне поле призводить до появи поперечного температурного поля у схрещеному магнітному полі [5].

1.6 Методика вимірювання ефекту Холла

Схема вимірювальної установки приведена на рис. 1.8. В якості досліджуваного зразка використовується антимоїд індію, з якого виготовлено прямокутну пластину. До пластини припаяно п'ять електродів з тонкого мідного дроту у точках 1,2,3,4 та 6.

Рис. 1.8. Схема вимірювальної установки

Через контакти 1 та 2 зразок підключається до джерела струму. Величина струму регулюється реостатом R і вимірюється міліамперметром мА. ЕРС Холла вимірюється за допомогою дзеркального гальванометра.

При вимірюванні ЕРС Холла застосовується контакт 3, який знаходиться на верхній грані зразка, і два контакти – 4 та 6 на протилежній грані. Підключення потенціометра викликано тим, що практично неможливо припаяти контакти на протилежних гранях зразка так, щоб вони знаходились на одній еквіпотенційній поверхні. Тому при проходженні через зразок струму гальванометр буде реагувати навіть при відсутності магнітного поля. Якщо до контактів 4 та 6 приєднати потенціометр, то, рухаючи бігунок, можна досягти умови, при якій відсутнє магнітне поле і показники гальванометра будуть рівні нулю.

Магнітне поле у зразку задається постійним магнітом. Індукція B магнітного поля визначається за допомогою дзеркального гальванометра, який працює у балістичному режимі. Для цього спостерігається балістичний викид світлового показника при внесенні і видаленні магнітного поля, яке діє на підключену вимірювальну котушку.

Магнітна індукція визначається за формулою:

де N – число витків вимірювальної котушки; S – її площа; C_g – балістична постійна гальванометра; n – балістичний викид світлового показника гальванометра; $R = R_g + R_k$ – повний опір ланцюга гальванометра (опір гальванометра + опір котушки).

Для визначення балістичної постійної гальванометра збирається схема, згідно наведеного рис. 1.9. За допомогою перемикача Π заряджають і розряджають конденсатор C та спостерігають балістичний викид n_1 світлового показника гальванометра Γ . Напруга, до якої заряджається конденсатор, вимірюється вольтметром.

Балістична постійна гальванометра:

При розряді конденсатора рух рамки гальванометра відбувається в режимі вільних коливань (ланцюг розімкнений), а при вимірюванні магнітного потоку – в режимі, близькому до критичного (гальванометр замкнений на вимірювальну котушку).

Рис. 1.9 Схема для визначення балістичної постійної

Балістична постійна гальванометра при критичному режимі C_6 більша за балістичну постійну в режимі вільних коливань C_6 в e разів, тобто:

При вимірюванні ЕРС Холла тримач зі зразком напівпровідника поміщають між полюсами постійного магніту, пропускають через нього струм і спостерігають відхилення показника гальванометра n . Якщо в ланцюзі гальванометра проходить струм $I_L = C_i n$, то різниця потенціалів Холла:

де C_i – постійна гальванометра за струмом; $R = R_L + R_{3-5}$ – повний опір ланцюга гальванометра (опір рамки + опір між контактами).

Якщо зразок видалено з магнітного поля і при переміщенні рухомого контакту 5 світловий показник гальванометра не встановлюється на нульову поділку шкали, то можна переходити до вимірювань, однак виконувати їх при двох протилежних напрямках магнітного поля, що необхідно для виключення можливої помилки.

Тоді отримані при різних напрямках магнітного поля значення різниці потенціалів Холла можуть бути описані так:

– середнє значення відхилення світлового показника, отримане з двох вимірювань при взаємно протилежному напрямі магнітного поля відносно зразка. Зміну напрямку магнітного поля зручно зробити так: вийняти зразок з простору між полюсами і повернути магніт на 180° .

1.7 Проблеми, пов'язані з експериментальним спостереженням ефекту Холла

По-перше, при експериментальному визначенні різниці потенціалів слід звернути увагу на те, що наряду з ефектом Холла мають місце деякі інші ефекти: гальваномагнітний, термомагнітний, не точне розташування контактів, з яких знімається ЕРС Холла, на одній вертикалі до широкої сторони зразка тощо. Для виключення впливу цих побічних ефектів використовують властивість їх парності, тобто незалежності від напрямку магнітного поля. Між тим, ефект Холла є непарним ефектом і змінює знак при зміні напрямку магнітного поля. Для виключення побічних ефектів та визначення дійсного значення ЕРС Холла, напругу між холівськими контактами вимірюють при двох протилежних напрямках магнітного поля. Якщо $U_1 = U_H + U_{\text{поб}}$, $U_2 = -U_H + U_{\text{поб}}$, тоді:

Тобто вплив побічних ефектів буде компенсовано [4].

По-друге, контакт металу та напівпровідника має нелінійну залежність струму через нього від прикладеної напруги (випрямляючий контакт). Цей ефект має дуже широке застосування на практиці, однак він може спотворити явище, яке спостерігається, наприклад ефект Холла. Тому опір зразка не можна виміряти звичайним для металу способом, оскільки в цьому випадку в

результати увійде опір контактів, який для напівпровідника може бути в кілька разів вищим, ніж опір самого зразка. Тому вимірювання електропровідності напівпровідників зазвичай виконуються зондовим методом за допомогою двох додаткових контактів, які підключено до кристалу напівпровідника між контактами, які проводять до нього струм, за компенсаційною схемою, що забезпечує рівність нулю струму через «зондові» контакти.

ЕРС Холла лінійно залежить від сили струму через зразок та індукції магнітного поля. Тому залежності повинні являти собою прямі лінії, які проходять в осях U_H, I та U_H, B через початок координат [4].

1.8 Фотопровідність напівпровідників

Явище поглинання світла напівпровідниками застосовується при створенні модуляторів світлового потоку, фотоприймачів та при перетворенні світлової енергії в електричну. Для виконання модуляції світлових потоків можна використати залежність коефіцієнта поглинання біля краю власної смуги від тиску, зовнішнього електричного поля або концентрації носіїв заряду чи використати залежність поглинання світла носіями від концентрації цих носіїв.

При власному та домішковому поглинанні виникають вільні носії заряду, що призводить до збільшення провідності напівпровідника. Явище вивільнення електронів всередині матеріалу під дією світлового випромінювання дістало назву «внутрішній фотоефект». Додаткова провідність, яка виникає у напівпровіднику під дією світла називається фотопровідністю. Основна провідність, яка зумовлена тепловим збудженням носіїв заряду, називається темною провідністю. Прилади, які змінюють свій опір, а отже і провідність, під дією світлового випромінювання називаються фоторезисторами.

На рис.1.10. показано фоторезистор та схему його включення. Чутливим елементом фоторезистора є брусок або плівка монокристалічного чи полікристалічного напівпровідника, який має два омичних (невипрямляючих) контакти. Він приєднується до джерела зміщення U_0 через опір навантаження R_n . Товщина чутливого елемента має бути достатньою для того, щоб поглинути усе випромінювання $W_0(1-r)$, яке пройшло крізь освітлювану поверхню. Наведену умову можна легко виконати для власних фоторезисторів і зазвичай важко виконати для домішкових. Якщо умова виконується, то число носіїв (пар носіїв для власного поглинання), які генеруються падаючим світлом за одиницю часу в чутливому елементі при $\lambda \leq \lambda_{max}$, буде рівним:

де W_0 – потужність випромінювання; r – коефіцієнт відбиття поверхні; η – квантовий вихід внутрішнього фотоефекту, який рівний числу носіїв, що генеруються в середньому кожним поглинутим фотоном. Цей коефіцієнт може бути більшим за 1 у випадку, якщо при поглинанні фотона утворюється дві або більше електронно-діркових пари, або меншим за одиницю, якщо частина падаючих фотонів поглинається носіями заряду [9].

Рис.1.10 Схема пристрою та включення у коло фоторезистору

Під дією напруги, яка прикладається до фоторезистора, носії заряду, які утворені дією випромінювання, зазнають впливу електричного поля і здійснюють напрямлений (дрейфовий) рух. У колі виникає струм, який називається фотострумом I_{ϕ} . Кожен носій заряду за час свого життя проходить через резистор разів, де $t_{\text{пр}}$ – час прольоту (дрейфу) носія через резистор.

Цей час визначається як відношення довжини чутливого елементу резистора l до швидкості дрейфу носіїв заряду v_d :

де u – рухливість носіїв заряду; U – прикладена напруга. Сила фотоструму I_{ϕ} пропорційна числу носіїв заряду, які генеруються кожною миттю у напівпровіднику під дією світла:

де q – заряд електрона; n – число надмірних носіїв заряду у фоторезисторі. Якщо під дією випромінювання виникає пара носіїв заряду, то замість u слід підставляти суму рухливостей $u_n + u_p$.

Підставивши у (1.46) вираз для G з (1.44) отримаємо:

де h – стала Дірака (зведена стала Планка); h – стала Планка; c – швидкість світла у вакуумі; λ – довжина хвилі.

Відношення:

характеризує чутливість фоторезистора. Вона прямо-пропорційна довжині хвилі випромінювання λ , прикладений до кристалу напрузі U , часу життя носіїв заряду t та рухливості цих носіїв, а також є обернено-пропорційною до квадрату довжини чутливого елемента фоторезистора [7].

За часом життя носіїв заряду визначають чутливість, яка є вищою при більшому значенні t . Проте зі зростанням часу життя носіїв заряду також збільшується інерційність приладу. Якщо розглянути характер спаду фотопровідності після вимкнення джерела світла (рис.1.11.), то бачимо, що протікання рекомбінації зменшує концентрацію носіїв за експоненціальним законом:

Рис. 1.11. Крива наростання фотопровідності при дії на напівпровідник імпульсу світлового випромінювання і спаду після припинення опромінення

За цим же законом відбувається і спад фотопровідності у напівпровіднику:

де τ – час життя носіїв; S_{ϕ_0} – стаціонарна фотопровідність за умови постійної освітленості чутливого елемента фото-резистору.

З виразу (1.50) видно, що при більшому часі життя вільних носіїв спад фотопровідності буде відбуватися повільніше і фотоприймач буде мати більшу інерційність. Дотична, проведена до кривої спаду у точці t_0 , буде відсікати на осі часу такий відрізок, який за значенням рівний часу життя вільних носіїв заряду у напівпровіднику. Цей метод часто застосовують на практиці для експериментального визначення часу життя.

На рис. 1.11 також показано характер наростання фотопровідності напівпровідника після початку дії світлового імпульсу (крива ОВ), який описується даним рівнянням:

У цьому випадку дотична також відсікає відрізок, але вже на прямій АВ, який за значенням рівний τ . У полікристалічних структурах чутливість

зазвичай визначається процесами за межами монокристалічних зерен, на відміну від монокристалів. Процеси в об'ємі напівпровідника мало впливають на чутливість, тому застосувати тут (1.48) неможливо.

Застосування фотоефекту у напівпровідниках:

1) **Електрографія.** Внутрішній фотоефект для напівпровідників широко застосовується в електричній фотографії (електрографії).

Суть ефекту полягає в наступному: на аркуш паперу наносять тонкий шар напівпровідника з високим питомим опором (зазвичай це оксид цинку – ZnO). Перед самим фотографуванням плівку за допомогою газового розряду заряджають негативно. При проекції зображення на такий папір поверхневий заряд з дуже освітлених частин зникає швидше, ніж із мало освітлених, через що на папері виникає електричне зображення об'єкта. Для прояву електричного зображення папір обдувають слабким потоком заряджених частинок із спеціальної сухої фарби. Частинки осідають там, де зберігся негативний заряд, і проявляють зображення. Для фіксації утвореного зображення папір нагрівають, частинки фарби розплавляються і закріплюються на папері.

2) **Кристалічні лічильники.** Внутрішній фотоефект у напівпровідниках також може бути викликаний опроміненням напівпровідників потоком електронів, іонів, α -частинок тощо. Ці частинки проникають вглиб напівпровідника і генерують на своєму шляху вільні носії заряду, чим підвищують електропровідність, а при незмінній напрузі збільшують силу струму у колі. Число носіїв, які виникають, пропорційне числу частинок, що падають на напівпровідник, тому за зміною сили струму в колі можна зробити висновок про число частинок, які потрапили на напівпровідник. На цьому принципі можна побудувати кристалічний лічильник частинок. Часто вони проградуйовані не одиницями струму, а числом частинок. Щоб збільшити чутливість лічильника застосовують спеціальні радіотехнічні схеми – вони посилюють зміну сили струму в колі.

3) **Екситони.** Як зазначено вище, при збудженні власної фотопровідності електрони з валентної зони переходять у зону провідності і стають вільними. Проте, можливий інший варіант – збуджений електрон не розриває зв'язку з діркою у валентній зоні, а утворює з нею єдину зв'язану систему. Таку систему і було названо екситоном. Він схожий з атомом гідрогену: в обох випадках навколо одиничного позитивного заряду рухається електрон і його енергетичний спектр буде дискретним (рис.1.8.3). Рівні енергії екситона розташовані біля дна зони провідності. Екситони електрично нейтральні, тому їх поява у напівпровіднику не призводить до появи додаткових носіїв заряду, через що не зростає провідність напівпровідника. При зіткненні з фононами, атомами домішки або іншими дефектами екситони рекомбінують чи «розриваються». В першому випадку збуджені атоми повертаються у нормальний стан і збудження передається решіткам або випромінюється; у другому випадку утворюється пара – електрон і дірка, які зумовлюють зростання електропровідності [7].

Рис.1.12 Екситонний стан

1.9 Огляд напівпровідників з внутрішнім фотоелементом для реалізації сенсора Холла

Як було зазначено вище, найкращими матеріалами для гальваномагнітних перетворювачів є ті, для яких рухливість дірок або електронів значно вища, ніж рухливість інших носіїв заряду. В таблиці 1.2. наведено дані для деяких напівпровідникових матеріалів [2].

Таблиця 1.2.

Параметри напівпровідникових матеріалів

Як видно з табл. 1.2., нелегований антимонід індію (InSb) має найбільшу рухливість електронів (76000) при порівняно низькій рухливості дірок (близько 5000), а також має найбільшу довжину вільного пробігу електронів серед усіх відомих напівпровідникових матеріалів, за винятком вуглецевих матеріалів (графен, вуглецеві нанотрубки).

Перспективним матеріалом також є фосфід індію (який також є напівпровідником з фотопровідністю), оскільки він має значну рухливість електронів і значно меншу рухливість дірок. Цей матеріал є дуже перспективним при створенні НВЧ пристроїв. Концентрація носіїв заряду та їх рухливість може бути збільшена у фосфіді індію за допомогою використання тонких плівок цього матеріалу, нанесеного на підкладку з арсеніду галію, який легується хромом або плівок, які осадилися на підкладку, легується залізом. Також значної концентрації (до 10^{17} см^{-3}) можна досягти у нелегованих полікристалічних плівках фосфіду індію при рухливості електронів $10 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$ та питомому опорі $10 \dots 100 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Плівки з дірковою провідністю, які легують цинком, мають питомий опір $18 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ при концентрації дірок та рухливості [3].

Графен

Графен представляє двовимірну модифікацію вуглецю, в якій атоми об'єднані в гексагональну кристалічну решітку, а його товщина складає всього один атом. При цьому матеріал володіє унікальними властивостями[8]:

- Рекордно велика теплопровідність.
- Велика механічна жорсткість, він міцніший за сталь в сотні разів.
- Висока гнучкість.
- Велика електропровідність.
- Його температура плавлення знаходиться вище 3000 градусів.
- Непроникність для більшості газів і рідин.
- Прозорість.

Ринок застосування графену безпосередньо пов'язаний з прогресом у виробництві графену з властивостями, які потрібні для конкретного його використання. На поточний момент розвиваються і застосовуються десятки методів по отриманню графену різної якості, форми і розміру. Серед методів, які можуть бути використані, можна виділити три класи, одержуваного графену:

1)Пластівчастий відновлений оксид графену, який застосовується для провідних фарб, композитних матеріалів тощо.

2)Плоский G, застосовуваний для створення високопродуктивних електронних пристроїв.

3)Плоский G, застосовуваний для створення неактивних і низькопродуктивних пристроїв. Властивості конкретного класу графену, а значить і функціонал додатків, де можна його задіяти, дуже сильно залежать від якості підкладки, матеріалу, типу дефектів тощо. А це в першу чергу визначається методом виробництва.

Графен в залежності від методу виробництва сьогодні застосовується в наступних напрямках:

1)При механічному відшаруванні графен застосовується для досліджень. Рухливість становить $105 \frac{\text{с м}^2}{\text{В*с}}$.

2)При хімічному відшаруванні G застосовується для створення композитних матеріалів, покриттів, фарб, чорнила, конденсаторів, прозорих провідних шарів. Рухливість становить $100 \frac{\text{с м}^2}{\text{В*с}}$.

3)При хімічному відшаруванні через оксид графену матеріал застосовується для створення композитних матеріалів, покриттів, фарб, чорнила, конденсаторів, прозорих провідних шарів. Рухливість становить

4) При методі CVD G застосовується для створення наноелектроніки, фотоніки, сенсорів, прозорих провідних шарів. Рухливість становить

5)При методі SiC G застосовується для створення електронних пристроїв, високочастотних транзисторів і інших пристроїв. Рухливість становить $1000 \frac{\text{с м}^2}{\text{В*с}}$.

До переваг графена можна віднести наступне:

-Висока електропровідність. G - може проводити електрику як звичайна мідь. На його основі можна створювати різні електричні прилади.

-Відмінна оптична чистота. G - може поглинати тільки трохи більше двох відсотків видимого світла незалежно від характеристик випромінювання. Внаслідок цього даний матеріал практично безбарвний. Сторонній спостерігач може назвати його невидимим.

-Висока механічна міцність. G - по міцності перевершує алмаз.

-Гнучкість. G - є більш гнучким, ніж кремній. За даними параметрами він навіть перевершує гуму. Завдяки одношаровій структурі можна змінювати форму і розтягувати графен в міру необхідності.

-Здатність протистояти зовнішнім впливам.

-Рекордна теплопровідність. G - за цим показником перевершує мідь в десять разів.

До недоліків графена можна віднести наступне:

-На даний момент важко отримувати G великої площі в промислових масштабах із заданими високо-хімічними характеристиками. Вдається отримати лише невеликі за розмірами листи графена.

-Промисловий G за своїми властивостями в більшості випадків програє екземплярів, які отримані в наукових лабораторіях. Тому досягти аналогічних

характеристик при застосуванні промислових засобів на даний момент не вдається, незважаючи на вдосконалення технологій.

-Виробництво графена вимагає значних витрат, що обмежує його застосування [8].

Використання графену у якості провідника доцільне через його характеристики, зокрема високу рухливість носіїв заряду, а також через те, що пристрої на основі антимоніду індію мають нестабільні характеристики, тому рідко застосовуються для вимірювань. Також є можливим отримання графену невеликої площі, чого достатньо для досліджуваного сенсора і графен дозволяє створювати високошвидкісні та високопродуктивні електронні пристрої.

Висновки:

Розглянуто принцип роботи гальваномагнітного перетворювача Холла у слабких та сильних магнітних полях. Розглянуті основні типи сенсорів Холла та їх параметри. Для врахування метрологічних проблем наведено температурну залежність ефекту Холла у напівпровіднику. Описані загальні проблеми при експериментальному спостереженні гальваномагнітного ефекту Холла. Для подальшого аналізу зібрані основні параметри матеріалів для гальваномагнітних перетворювачів, що зазвичай використовуються та можуть бути використані для виготовлення сенсорів Холла для магнітометра.

2 РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СЕНСОРУ ХОЛЛА НА ОСНОВІ МОНОКРИСТАЛУ CdS

2.1 Технологія виготовлення сенсору Холла на поверхні монокристалу CdS, наплення омичних контактів

В якості матеріалу для сенсора було обрано два монокристали CdS з розмірами 5*5 мм та 10*5 мм (рис. 2.1 та 2.2 відповідно). Товщина обох кристалів однакова і складає 0,5 мм. Властивості кристалів:

Структура кристалічної решітки: гексагональна

Кристаліграфічна орієнтація: (0001)

Ширина забороненої зони: 2,55 eV (вздовж оптичної осі при 300 K)

Питомий опір: 10^{10} Ом*см (для нелегованих кристалів CdS)

Концентрація носіїв заряду: орієнтовно 10^{17} м⁻³

Рис. 2.1 Фотографія кристалу CdS з розмірами 5*5 мм [18]

Кристал має незначний дефект у верхньому лівому куті, однак це не є суттєвим при виконанні даної роботи. Сенсор Холла також можна виготовити на іншій стороні кристалу, оскільки він має дві поліровані грані.

Рис. 2.2. Фотографія кристалу CdS з розмірами 10*5 мм [18]

В якості матеріалу для наплення контактів на поверхню кристала використовується алюміній. На перший кристал алюміній наплений відразу на кристал, це викликало появу потенційного бар'єру. Контакти були нанесені вакуумним випаровуванням, оскільки цей процес є відносно дешевим і не займає багато часу (наприклад, процес відривної літографії був би дорожчим і займав більше часу). Товщина нанесеного шару Al складає 500 нм, шаблон

для вакуумного випаровування було виготовлено з мідної фольги. Шаблон маски був розроблений у програмному середовищі “Eagle” (рис. 2.3.).

Рис. 2.3. Розроблений шаблон маски у програмі “Eagle” [18]

Результат вакуумного випаровування відображено на рис. 2.4.

Рис. 2.4 Алюмінієві контакти, нанесені на квадратний кристал CdS [18]

Геометрія контактів, які були нанесені на підкладку, не зовсім відповідає необхідній геометрії. Ймовірно, що трафарет ковзав під час процесу вакуумного випаровування, тому було отримано неправильне розміщення. Однак, “хрест” з відстанню між контактами 1 мм все ж було отримано успішно.

Кристал з напиленими контактами кріпиться за допомогою клею на друковану плату з мідною поверхнею. Товщина міді у цьому випадку складає 36 мкм. Друкована плата була розроблена саме для вимірювальної установки. Макет також було розроблено за допомогою програмного середовища “Eagle”(див.рис. 2.5).

Рис. 2.5 Дизайн друкованої плати (у середовищі “Eagle”) [18]

Після цього необхідно з’єднати алюмінієві контакти на підкладці з мідними контактами на платі. Для цього є два методи – термозвукове та ультразвукове зварювання. Але обидві спроби не були успішними. Результати можна побачити на рис. 2.6.

Рис. 2.6 Демонстрація відриву напилених Al контактів через погану адгезію [18]

Для покращення адгезії між матеріалами на прямокутний кристал сульфиду кадмію спочатку був напилений додатковий шар титану Ti товщиною 10 нм. Після цього на титан напилений 500 нм шар алюмінію, який вже дозволив приєднатись з допомогою термозвукової мікрозварки. У якості контактних дротів використані Au провідники діаметром 20 мкм.

2.2 Розробка структурної схеми експериментальної установки для дослідження фотопровідності монокристалу CdS

В якості елементу освітлення було використано лазер з наступними властивостями:

- А) Довжина хвилі: 650 нм (червоний колір)
- Б) Потужність: 5 мВт
- В) Емісійні характеристики: поперечні
- Г) Клас лазера: 2

Після підготовки друкованої плати з підкладкою CdS, пристрої (такі як лабораторне джерело живлення, генератор сигналів, осцилограф) були підключені до вимірювальної установки так, як показано на рис. 2.7.

Рис. 2.7. Структурна схема вимірювальної установки для дослідження фотопровідності

Пояснення до схеми:

1 – вихід №1 генератора сигналів. Результат передачі сигналу знімається з резистора R1=51 кОм за допомогою першого CH1 каналу осцилографа (жовтий колір на екрані осцилографа).

2 – вихід №2 генератора сигналів. Результат передачі сигналу знімається з резистора R2=4,7 кОм за допомогою осцилографа з каналом CH2 (синій колір на екрані осцилографа).

Встановлюємо такі параметри для першого сигналу:

На рис. 2.8. показано результат передачі першого сигналу (IN1) з частотою 1 кГц без впливу другого сигналу.

Параметри для другого сигналу:

На рис. 2.9 зображено результат передачі другого сигналу (IN2) на частоті 1 кГц без впливу першого сигналу.

Рис. 2.8 Осцилограма сигналу на частоті 1 кГц зі скважністю 40% переданий у вертикальному напрямку

Рис. 2.9 Осцилограма сигналу на частоті 1 кГц зі скважністю 20% переданий у горизонтальному напрямку

Сигнали без спотворених фронтів передаються на частотах до 100 кГц. Після частоти 100 кГц сигнал починає спотворюватися, що відбувається через великий час життя носіїв заряду.

Аналізуючи графіки спектральної чутливості фотопровідних матеріалів (рис. 2.10.) можна зробити висновок, що для ефективної генерації фотоелектронів потрібно використовувати випромінювання з довжиною хвилі 500 нм (зелене світло).

Рис. 2.10. Графік спектральної чутливості деяких матеріалів (включаючи CdS)

Отже, на основі рівнянь (1.1)-(1.50) та отриманих параметрів сенсора Холла можна підсумувати, що в якості матеріалів для сенсора Холла з фоточутливою активною областю можна вибирати будь-який фотоелектрик, але обов'язково має виконуватись умова, щоб була максимальна різниця між рухливостями електронів та дірок. Також виявилось можливим реалізувати сенсор Холла в приповерхневій області тонкого кристалу, що також дозволяє в перспективі збільшити чутливість сенсора Холла за рахунок зменшення товщини самого кристалу. Для компенсації постійної складової напруги Холла один з поперечних контактів слід робити розпареним і підмикати до мікровольметра через потенціометр (рис.1.8).

З РОЗРОБКА МАГНІТОМЕТРУ НА ОСНОВІ СЕНСОРУ ХОЛЛА З ФОТОЧУТЛИВОЮ АКТИВНОЮ ОБЛАСТЮ

3.1 Розробка експериментальної установки та функціональної схеми магнітометра

Експериментальна установка для дослідження параметрів сенсора Холла реалізованого на фотопровідному кристалі CdS зображена на рис. 3.1.

Рис. 3.1. Схема експериментальної установки. Де 1 – нановольтметр, 2 – генератор, 3 – блок позиціонування сенсора Холла, 4 – магніти, 5 – лазер.

Для освітлення кристалу використовується зелений лазер (довжина хвилі 500 нм) з потужністю 150 мВт, RIN=-90 дБ, джерелом магнітного поля слугує два неодимових магніти з індукцією 100 та 200 мТл.

Вигляд самої плати, на якій закріплено сенсор Холла, зображено на рис. 3.2, з'єднання кристалу з друкованою платою відображено на рис. 3.3 та рис. 3.4.

Рис. 3.2 Плата з кристалом CdS та лазер

Рис. 3.3 Друкована плата із закріпленим кристалом CdS

Рис. 3.4. Збільшене зображення сенсора Холла з контактними майданчиками з'єднаними з друкованою платою з допомогою ТУЗ зварювання.

Отримані експериментальні результати вимірювання магнітного поля зведені в табл. 3.1 та 3.2.

Таблиця 3.1

Експериментальні дані реєстрації магнітного поля з індукцією 0,1 Тл

Таблиця 3.2

Експериментальні дані вимірювання магнітного поля з індукцією 0,2 Тл

За отриманими експериментальними значеннями розрахована чутливість сенсора Холла за формулою:

де U_H – напруга Холла; B – індукція магнітного поля, що створюється неодимовим магнітом.

Отримані при розрахунку дані також зведені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3

Розраховані значення чутливості сенсора Холла

Пояснення отриманих експериментальних результатів:

- 1) Отримані результати мають незначну похибку вимірювання (до 5%).
- 2) При освітленні кристала майже вдвічі зростає струм через кристал, через це різниця потенціалів, яка викликана анізотропією кристала, у поперечних контактах збільшується вдвічі.
- 3) Приймаючи початкову різницю потенціалів, що викликана анізотропією кристала, за точку відліку, очевидним є двократне збільшення чутливості сенсора до магнітного поля з індукцією 0,1 та 0,2 Тл.
- 4) Різке відхилення напруги Холла двома окремими магнітами пояснюється тим, що контактні точки напилени під кутом до основного кристалографічного напрямку кристалу (що підтвердило інформацію в огляді). Таким чином рівноважні та генеровані опроміненням носії заряду зіштовхуються з різним опором (який можна розрахувати, знаючи тензор провідності кристалу).
- 5) Кристал працює, як сенсор Холла лише при постійній прикладеній напрузі. При подачі змінної напруги в діапазоні частот від 1 кГц до 1 МГц ефект Холла не спостерігається через малий час життя та рухливість носіїв заряду.

Отже, магнітометр на основі кристалу CdS має мати функціональну схему зображену на рис. 3.5:

Рис. 3.5. Функціональна схема магнітометра з фоточутливою активною областю сенсора Холла. Де 1 – магніт, 2 – друкована плата, 3 – сенсор Холла, 4 – джерело постійної напруги 10-25 В, 5 – лазер, 6 – мілівольтметр з малошумлячим підсилювачем

3.2 Вибір оптимального матеріалу для сенсору Холла з фоточутливою активною областю

При виборі оптимального матеріалу сенсора необхідно врахувати наступне: перш за все, важливим для матеріалу сенсора є значення рухливості носіїв заряду (електронів або дірок), співвідношення між рухливістю носіїв заряду, концентрація носіїв заряду та наявність фотоефекту у обраному матеріалі. Серед напівпровідників найкраще цим умовам задовольняє антимонід індію InSb, який має дуже високу рухливість

електронів, співвідношення між рухливостями електронів та дірок близько 15, невелику ширину забороненої зони (0,17 eV). Однак цей матеріал володіє нестабільними параметрами, тому не застосовується для точних вимірювань.

Наведені умови також задовольняють арсенід індію InAs – співвідношення рухливостей рівне 124, також має високу рухливість електронів, невелика ширина забороненої зони 0,36 eV – та фосфід індію InP, який має значно меншу рухливість електронів, однак має співвідношення рухливостей близько 6 та є більш стабільним (ширина забороненої зони складає 1,28 eV).

На вибір матеріалу також впливають умови середовища, в яких працюватиме сенсор:

Температура – зберігання та експлуатація при температурі, яка перевищує 100 °C, може значно погіршити роботу сенсора та магніту, який створює магнітне поле. Сенсори на основі ефекту Холла мають обмеження за максимальною температурою в діапазоні 85–150 °C. Після перевищення цих значень сенсор втрачає свою калібрування та перестає належним чином реагувати на магнітне поле.

Вологість – вона сильно впливає на вибір магнітного матеріалу і покриття магніту. Деякі магнітні матеріали, наприклад неодим, дуже чутливі до вологи та можуть руйнуватися, оскільки залізо під дією вологи зазнає корозії.

Удари та вібрація – параметри, які також слід враховувати, оскільки може знадобитися спеціальна орієнтація пластин.

Ультрафіолет – при зовнішньому монтажі матеріал сенсора також має витримувати довгострокову дію ультрафіолетового випромінювання.

Не менш важливими є **електричні параметри** сенсора:

А) Значення електричного навантаження на сенсор.

Б) Напруга та струм через сенсор – при освітленні кристала зростає напруга та струм через нього, що може призвести до перевантаження при неправильному розрахунку.

В) Змінною чи постійною є напруга – деякі сенсори не здатні правильно функціонувати при підведенні до них змінної напруги.

Г) Тип вихідного сигналу сенсора – аналоговим чи цифровим буде вихідний сигнал.

Магнітні параметри:

Сенсор Холла повинен бути спряжений з підходящим магнітом для коректної роботи. Для запобігання проблем та підвищення якості роботи магніту необхідно розглянути такі питання:

1) Використання програмного забезпечення для магнітного моделювання з метою отримання повного уявлення про магнітне середовище роботи сенсора в широкому діапазоні умов. Цей інструмент характеризує роботу сенсора при взаємодії з рухливими магнітними полями. Моделювання повинно враховувати будь-які чорні метали, які розташовані поруч з сенсором, оскільки вони можуть шунтувати магнітне поле. Дане моделювання може бути виконане до тестування на прототипах.

2) Для магнітних матеріалів також важливим є температурний режим. Деякі матеріали, як неодим, мають обмеження на максимально допустиму робочу температуру. Як тільки максимальна температура перевищена, щільність струму значно зменшується і не може бути відновлена. В неагресивних середовищах можуть добре працювати магніти з альніко або керамічні магніти. При високих температурах з великою кількістю коливань температури часто є необхідним дуже стабільний рідкоземельний магнітний матеріал, як наприклад самарій-кобальт.

3) Полярність та орієнтація магніту. Сенсор Холла часто працює лише з використанням північного чи південного полюса магніту.

4) Якщо допуски на активацію досить суворі, то кераміка не підходить і необхідно обирати магніт з неодиму чи самарій-кобальту.

5) Якщо неодим є хорошим вибором, то для захисту його від вологи можна застосовувати нікелеве покриття. Якщо необхідний рідкоземельний матеріал, то також можна обрати самарій.

6) Матеріал магніту не повинен бути надто дорогим при поставлених умовах.

З урахуванням усіх вище приведених вимог та рекомендацій в якості матеріалу для сенсора було обрано сульфід кадмію CdS, оскільки він має фотопровідність, задовільну рухливість носіїв заряду, досить високу стабільність параметрів, значний питомий опір, не чутливий до ультрафіолетового випромінювання, достатньо стійкий до вологості та вібрацій, також має задовільний температурний діапазон роботи. В якості магніту достатньо неодимового магніту, оскільки не вимагається висока стабільність і середовище не є агресивним до матеріалу магніту.

3.3 Розрахунок параметрів та характеристик спроектованого магнітометра

Важливим параметром магнітометра є його диференціальна чутливість S_m , яка може бути розрахована, як відношення зміни напруги Холла до зміни магнітної індукції поля:

де ΔU_H – зміна напруги Холла, що зумовлена зміною магнітного поля;
 ΔB – зміна індукції магнітного поля.

Значення чутливості були розраховані, а результати наведені у табл. 3.3.

Час життя нерівноважних носіїв заряду τ_d також є важливим параметром магнітометра. Залежність концентрації надлишкових носіїв заряду від часу:

де Δn_0 – надлишкова концентрація носіїв заряду в момент увімкнення джерела світла. Диференціюємо дане рівняння за часом і отримаємо:

Знайдемо вираз для часу життя фотоелектронів:

Рухливість носіїв заряду:

-електронів

-дірок

де q – заряд електрона; v_d – дрейфова швидкість носіїв заряду в електричному полі з напруженістю E ; τ_d та τ_p – середній час життя

електронів та дірок відповідно; m_n^i та m_p^i - ефективна маса електрона та дірки відповідно [17].

3.4 Розрахунок малощумлячого підсилювача для реєстрації напруги Холла

Відповідно до технічних вимог, що висуваються до підсилювача, одним з основних параметрів при виборі схемного рішення є забезпечення мінімального коефіцієнту шуму (2 дБ) та максимальної завадостійкості. Аналіз схем та їх характеристик показує, що оптимальним буде використання одно-каскадної схеми з трансформаторним зворотним зв'язком і увімкненням транзистора за схемою зі спільною базою.

Таки підсилювач зазвичай має наступну структуру: вхідний та проміжний каскади. Число витків обмотки трансформатора, який підключено до емітера транзистора (w_e) , та число обмоток, які підключено до корпусу та колектору (w_0, w_1) співвідносяться з w_e як n_0, n_1 . Тоді коефіцієнт передачі підсилювача за напругою $K=n_0$. Визначаємо вхідний та вихідний опір, вважаючи, що вихід транзистора зі спільною базою – джерело струму, а трансформатор ідеальний:

Таким чином, вхідний опір каскаду пропорційний опору навантаження каскаду $Z_{\text{вх}}$, а вихідний опір – опору джерела сигналу $Z_{\text{вх}}$. З наведених формул можна зробити висновок, що виконується умова:

Приймаючи $n_0=3$, отримуємо: $n_1=3^2-3-1=5$.

Відповідно, при роботі каскаду в тракці з опором R_0 вхідний та вихідний опори каскаду будуть однаковими:

При цьому забезпечується узгодження на вході та виході каскаду, що сприяє зниженню нерівномірності його АЧХ.

Для роботи, виходячи з вимог ширини смуги пропускання та коефіцієнта підсилення обираємо транзистор КТ201А, який має такі параметри:

Структура: n-p-n

Максимальний струм колектора $I_{K\text{max}}$: 20 мА

Максимальна розсіювана потужність P_{max} : 150 мВт

Гранична частота $f_{\text{гр}}$: 10 МГц

Коефіцієнт h_{21e} : 20-60

Максимальна напруга між колектором та емітером $U_{KE\text{max}}$: 32 В

Струм між базою і колектором I_{KB0} : < 1 мкА

Ємність колекторного переходу C_K : < 20 пФ

З урахуванням вимог визначимо струм колектора так, щоб коефіцієнт шуму не перевищував 2 дБ. Для цього знаходимо для відносного числа витків трансформатора зворотного зв'язку оптимальний за динамічним діапазоном режим роботи транзистора: $I_K=10$ мА, $K_{\text{ш}}=2$ дБ.

Тепер розрахуємо елементи ланцюга зміщення. Задаємо напругу на емітері рівною 1,2 В (при напрузі живлення 12 В).

Тоді струм бази:

Струм емітера:

Визначимо опір R_1 :

Обираємо номінал $R_1=120\text{ Ом}$.
Розраховуємо струм подільника у ланцюзі бази:
Опір R_2 подільника у ланцюзі бази:
Обираємо номінал резистора $R_2=1,2\text{ кОм}$.
Визначаємо струм ланцюга живлення:
Опір R_4 :
Обираємо номінал резистора $R_4=110\text{ Ом}$.
Для визначення номіналів конденсаторів C_1 , C_2 та C_4 враховуємо, що їх реальні опори на нижній робочій частоті мають задовольняти умову:
Звідки знаходимо:
Обираємо номінал конденсаторів $C_1=C_2=C_4=3,3\text{ нФ}$.
Аналогічно знаходимо номінал конденсатора C_3 , враховуючи, що:
Обираємо номінал конденсатора $C_3=15\text{ нФ}$.
Тепер знайдемо значення опору R_3 :
Обираємо номінал $R_3=5,6\text{ кОм}$.
Схема електрична принципова розрахованої схеми зображена у додатку А. Друкована плата для монтажу розрахованих елементів приведена у додатку Б, а специфікація компонентної бази – у додатку В.

ВИСНОВКИ

Було розглянуто основи ефекту Холла у напівпровідниках, систематизовані напівпровідникові матеріали, в яких також проявляється фотоелектричний ефект, наведено таблицю з параметрами деяких напівпровідників. Проаналізовано методи експериментального спостереження ефекту Холла та складності при його експериментальному спостереженні. Описана технологія створення сенсору Холла на монокристалі сульфід кадмія, нанесення на нього омичних контактів. Описаний принцип роботи установки для експериментальних досліджень фотопровідності в магнітних полях.

За рахунок опромінення спроектованого сенсора Холла лазерним випромінюванням потужністю 150 мВт і довжиною хвилі 500 нм, вдалось збільшити напругу Холла удвічі, збільшивши таким чином чутливість сенсора удвічі.

Розроблений магнітометр на основі сенсору Холла з активною фоточутливою областю, який на відміну від існуючих аналогів, регулює чутливість вимірювання індукції магнітного поля за рахунок зміни фізичних параметрів самого сенсора, а не коефіцієнта підсилення вимірювальної системи.

Проведено розрахунок чутливості спроектованого магнітометра і встановлено, що ним можна вимірювати магнітні поля до 200 мТл з чутливістю 1мТл і похибкою вимірювання до 5%.

У зв'язку з часом життя 1 мкс та низькою рухливістю фотоелектронів ефект Холла на фотопровідному кристалі CdS проявляється лише при подачі постійної напруги. З огляду на зазначену обставину спроектований та розрахований малошумлячий підсилювач для реєстрації постійної напруги Холла під час вимірювань індукції магнітного поля.

SUMMARY

_____Magnetometer based on Hall sensor with active photosensitive area_____
Keywords: Hall sensor, Hall effect, photosensitivity, magnetometer, CdS monocrystal_____

Summary of the project: 3 pages

This thesis is devoted to the development and study of a magnetometer based on the Hall sensor with photosensitive active region. The paper presents the experimental values obtained during the measurements, the results of engineering calculations and comparison of obtained results with the theoretical results.

The introduction provides a formulation of the main objectives of the work, the classification of the existing magnetometers, the urgency of the theme work. In the literature review, theoretical information regarding the basics of hall effect in a semiconductor, given the parameters, which depend on the voltage of the Hall.

The peculiarities of the Hall effect in weak magnetic fields and strong magnetic fields. It is shown that in strong magnetic fields is introduced, such parameter as the "effective" relaxation time and the measurement of the Hall effect in weak and strong magnetic fields allows to define a relationship between carrier mobility and hall mobility.

A classification of existing sensors of the Hall, given their structural shape, the materials from which they are made, as well as the parameters of some sensors, which are manufactured from a specific semiconductor material. Given the use of Hall sensors as sensors of linear and angular displacements, as well as position detectors.

Since the Hall effect is also dependent on temperature, the dependence of the Hall coefficients from the temperature sensor. Shows the relationship of the Hall effect with other galvanic - and thermo-magnetic effects, and the relationship of the Hall effect with magnetoresistive effect(change in resistance under magnetic field).

Also describes a method of measuring the Hall effect. This technique allows to compensate for some inaccuracies that can occur when experimental observation of the Hall effect. The possibility of compensation arises in that the Hall effect is an odd effect, i.e., changes sign when the direction of the magnetic field. It is shown that the measurement by conventional method is impossible, because the contact resistance will make a large error in the results. Instead, a probe method of measurement – the application of the additional contacts, which are connected to the crystal by the compensation scheme.

The peculiarities of the phenomenon of photoconductivity for semiconductors and how this effect is related to the Hall effect in the crystal. Considered the sensitivity of the photoresistor, the dependence of the photocurrent on various parameters, growth, and decay of photoconductivity when exposed to light and no lighting. Also given the use of the phenomenon of the photoelectric effect in practice, namely for electrograph (electric picture), the crystal counter (particle counter), excitons.

Given the parameters of semiconductor materials with the aim of choosing the optimal for the magnetometer of the material. Also the properties and the

possibility of using graphene for the realization of the sensor, since this material has the best parameters and application prospects.

The second section of this work describes the parameters of the crystal, which was used to create Hall sensors. The crystal was formed contact areas and the contact formed by the introduction of additional material between the layers of conductor and semiconductor. The connection was formed by using a thin layer of titanium and the application of thermo-sonic welding.

For experimental measurements was obtained crystal is connected with the PCB track. In the experiment there was a transmission in the lateral directions through the crystal to determine the effect of signals on each other during simultaneous transmission. The results of measurements for two signals with different parameters. The results obtained clearly indicate the presence of a single crystal semiconductor. To increase the sensitivity of Hall sensors was proposed not only to use material with a maximum difference of the mobility of charge carriers, but also to realize the sensor in the surface layer of the semiconductor.

In the third part of the paper shows a diagram of the dimensions and parameters of the component parts of the scheme. Experimental values with uncertainties and average values of voltage measurements. Experimental data are summarized in the table, the measurements were carried out under different conditions with different magnets. According to the obtained results and formulated conclusions. The results show that the measurement accuracy is quite high, with the illumination of the crystal is almost two times increases the current through the crystal and the sensitivity, the sensor works correctly only when applying a DC voltage.

After measurements, the conditions are given, which were carried out material selection of the sensor and magnet. As a material for the sensor was applied CdS, and to create enough magnetic field of a neodymium magnet.

The obtained data was calculated sensitivity of the magnetometer, the time of life of carriers, their mobility. At the end of the work has been carried out engineering calculation of the amplifier has a low noise figure and large gain value. This amplifier is necessary because the voltage value of the Hall can be miles of volts, or even less. Therefore, a reliable register requires high gain (allows you to output a few volts) and the lack of amplification of interference and noise (noise figure less than 2 dB). After that the general conclusions on work are resulted and the list of the scientific and technical literature which was used at writing of work is resulted.

Схожість

Схожість із джерелами з Інтернету

17

1	https://ua.in.ua/hrafen-prystrij-i-zastosuvannia-osoblyvosti-ta-perspektyvy.html	4.19%
2	http://www.8ref.com/9/referat_96553.html	3 Джерело 0.35%
3	https://studopedia.com.ua/1_125381_osnovni-galvanomagnitni-efekti.html	0.31%
4	http://shron1.chtyvo.org.ua/Pavlov_Serhii/Osnovy_mikroelektroniky.pdf	3 Джерело 0.29%
6	https://studfile.net/preview/2276580	0.12%
7	https://docplayer.net/50339319-Osnovi-fiziki-napivprovodnikiv-i-napivprovodnikovih-priladiv.html	3 Джерело 0.12%
9	https://otherreferats.allbest.ru/radio/00043258_0.html	0.1%
10	https://en.ppt-online.org/138643	2 Джерело 0.1%
16	https://patents.google.com/patent/JPH0981308A/en	0.09%
18	https://patents.google.com/patent/NL8200154A/en	0.09%

Схожість по Бібліотеці акаунту

11

5	Тарасюк М.М. Маг. дис	ID файлу: 11971037	Institution: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechni...	0.19%
8	2020-bachelor-EDD_Melnyk_nerhospozhyvannya_ofisa_fch	ID файлу: 1004048812	Institution: National Technical Univ...	0.1%
11	Денисюк_маг	ID файлу: 1000778208	Institution: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechni	2 Джерело 0.1%
12	2020-bachelor-EDD_Mazur_Blok_keruvannya_fch	ID файлу: 1004076729	Institution: National Technical University of U...	0.1%
13	plagiat volosan	ID файлу: 6004245	Institution: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"	0.1%
14	Лєдєньов	ID файлу: 5511809	Institution: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"	0.1%
15	ПЗ_Stelmakh_Antiplagiat	ID файлу: 1000076275	Institution: National Technical University of Ukraine "Kyiv	2 Джерело 0.09%
17	Студентська робота	ID файлу: 5964547	Institution: Lviv Polytechnic National University	0.09%
19	Analysis of stress-strain state of three-layer structures ma	ID файлу: 11891426	Institution: National Technical Univer...	0.09%

Цитати

Цитати

2

1 1.3. Залежність дрейфової рухливості електронів та дірок в Si та Ge та холівської рухливості в арсеніді галію (GaAs) від концентрації атомів легуючої домішки (при $T=300\text{ K}$) 1.2 Ефект Холла у слабких магнітних полях Під слабким магнітним полем розуміють таке поле, у якому довжина вільного пробігу зарядженої частинки (електрона чи дірки) значно менша за її кругову траєкторію.

2 1.2., нелегований антимонід індію (InSb) має найбільшу рухливість електронів (76000) при порівняно низькій рухливості дірок (близько 5000), а також має найбільшу довжину вільного пробігу електронів серед усіх відомих напівпровідникових матеріалів, за винятком вуглецевих матеріалів (графен, вуглецеві нанотрубки).