

Вплив магнітного поля на електричні параметри QFS-графенових сенсорів Холла

Національний університет «Львівська політехніка»

У даній роботі проведено всебічне дослідження польових та магніторезистивних властивостей сенсорів Холла на основі quasi-free-standing (QFS) графену з метою оцінки їх стабільності та працездатності у сильних магнітних полях. Сенсори Холла на основі графену привертають значну увагу завдяки унікальним електронним властивостям матеріалу, зокрема високій рухливості носіїв заряду, двовимірній структурі та квантовому характеру провідності, що дозволяє досягати рекордних значень чутливості та магнітоопору. Особливу увагу приділено QFS графену, який характеризується низьким рівнем дефектності та мінімальним магніторезистивним ефектом, що робить його перспективним для створення високоточних сенсорів Холла. Для експериментальних досліджень сенсори Холла були виготовлені у вигляді плівкових структур з однорідним шаром QFS-графену. Вимірювання проводилися за допомогою спеціалізованого стенду з електромагнітом, здатним генерувати контрольоване магнітне поле до $\pm 0,5$ Тл, а точна реєстрація сигналів забезпечувалася високочутливими нановольтметрами. Зразки оберталися у магнітному полі з кроком 5° для дослідження кутових залежностей опору та холлівського сигналу, а результати нормалізували відповідно до теоретичних функцій $\cos\theta$ та $\cos^2\theta$ для оцінки відповідності класичним магніторезистивним закономірностям. Результати показали, що холлівський сигнал сенсорів Холла на основі QFS-графену демонструє чітко виражену лінійну залежність від магнітного поля з високою точністю апроксимації (середня похибка $\approx 0,09\%$), що свідчить про однорідність матеріалу та стабільність електронного транспорту. Паразитний off-set сигнал виявився залежним від магнітного поля і мав переважно квадратичний характер, що свідчить про його магніторезистивне походження. Ця залежність пояснюється впливом магніторезистивних механізмів на резистивну природу off-set сигналу, зокрема через асиметрії геометрії, неоднорідності провідності та контактні опори, які змінюють розподіл струму у зразку під дією зовнішнього поля. Аналіз кутових залежностей поверхневого опору показав, що для більшості зразків магніторезистивний ефект не підпадає під класичну квадратичну залежність $\cos^2\theta$, тоді як частина сенсорів демонструвала гармонічну, косинусоїдальну залежність, добре узгоджену з теоретичною функцією $\cos\theta$, що відповідає орбітальному механізму магніторезистивності в графені. Для деяких зразків було зафіксовано негативний магніторезистивний ефект, який корелює з $-\cos\theta$, що узгоджується з літературними даними про вплив дефектності та локалізації носіїв заряду на знак магніторезистивності. Додаткові фактори, такі як одночасна наявність електронної та діркової провідності та вплив локальних областей електронів і дірок, можуть компенсувати внески різних носіїв, послаблюючи прояв магніторезистивності при малих магнітних полях. Отримані результати демонструють, що сенсори Холла на основі QFS-графену поєднують високу чутливість, лінійність відгуку та мінімальний магніторезистивний ефект, що робить їх перспективними для застосування у високопольових вимірювальних системах, магнітній діагностиці та системах контролю термоядерних реакторів. Дослідження дозволяє уточнити принципи проєктування сенсорів Холла для умов екстремальних магнітних полів, враховуючи вплив структурного безладу та орбітальних ефектів на електронний транспорт у графені.

Ключові слова: сенсори Холла, графен, магніторезистивність, магнітні поля, поверхневий опір, метод обертового струму.

Вступ

Сенсори Холла на основі графену привертають значну увагу завдяки

унікальним електронним властивостям цього матеріалу та потенціалу для роботи в екстремальних умовах [1, 2]. Одношаровий епітаксіальний графен, зокрема, розглядається як один із найперспективніших матеріалів для створення електронних і магнітних пристроїв нового покоління [3, 4]. Його двовимірна структура, висока рухливість носіїв заряду та квантовий характер провідності забезпечують рекордні значення магнітоопору та чутливості, що робить графен привабливим для сенсорних застосувань у широкому діапазоні магнітних полів [5].

У деяких експериментальних реалізаціях графен демонструє магнітоопір понад 100% вже при магнітних полях порядку 0,1 Т та кімнатній температурі [5], а в графенових гетероструктурах типу graphene/h-BN досягнуто надвисокої магніторезистивності — понад $4,6 \times 10^7\%$ та чутливості $dR/dB \sim 10^4$ кΩ/Т [6]. Крім того, гібридні структури на основі графену й манганітів демонструють високу температурну стабільність та працездатність у діапазоні 0,1–2,3 Т [7], а графенові нанострічки підтверджують теоретичні моделі тунельних ефектів, виявляючи до 100 % негативного магнітоопору при низьких температурах [Citation]. Розвиток цих досліджень тісно пов'язаний із фундаментальними явищами квантового транспорту, такими як цілочисельний [8] та дробовий квантовий ефект Холла [9], а також з технологіями на основі гігантського магнітоопору [10, 11].

З іншого боку, однією з ключових задач сучасної науки й техніки залишається створення високочутливих, стабільних сенсорів для роботи в сильних магнітних полях [12]. Особливе значення це має для систем контролю термоядерних реакторів, зокрема токамаків, де магнітні поля сягають кількох Тесла, а сенсорні елементи повинні зберігати точність і стабільність протягом тривалого часу в умовах інтенсивного опромінення та підвищених температур [13].

Графенові сенсори Холла мають низку переваг у таких застосуваннях: висока рухливість носіїв забезпечує швидку реакцію на зміну магнітного поля [14], термостійкість графену дозволяє витримувати температури, характерні для термоядерних установок [15], а стійкість до радіаційного впливу робить такі сенсори перспективними для довготривалої експлуатації. Дослідження показують, що графенові сенсори Холла можуть суттєво перевищувати за чутливістю традиційні Si- та III/V-сенсори — наприклад, графен, інкапсульований у h-BN, демонстрував чутливість до 5700 V/AT [16].

Водночас магніторезистивний ефект у графенових сенсорах Холла є небажаним, оскільки змінює напругу Холла та ускладнює точні вимірювання. Саме тому відсутність магніторезистивного ефекту в квазі-вільному (QFS) графені є значною перевагою для застосування в сенсорах Холла. Це дозволяє мінімізувати паразитні ефекти та забезпечити точність вимірювань навіть у сильних магнітних полях декілька Тесл.

У цій роботі досліджено стабільність, чутливість та працездатність сенсорів Холла на основі QFS графену у сильних магнітних полях. Результати дозволяють удосконалити принципи проектування сенсорів для використання в умовах термоядерного синтезу та розширити можливості практичного застосування графенових пристроїв у високопольових технологіях.

1. Матеріали та методи дослідження

Сенсори Холла були розроблені та виготовлені Інститутом мікроелектроніки та фотоніки Мережі дослідницьких інститутів Лукасевича,

Варшава, Польща. Більш детальний опис сенсорів наведений у попередніх публікаціях [17, 18].

Для реалізації вимірювань було побудовано досліджувальний стенд (рис. 1). У складі вимірювальної системи застосовувався електромагніт HMS 7500, здатний створювати контрольоване магнітне поле в діапазоні ± 1 Тл. Живлення електромагніту здійснювалося від джерела MPS 647. Для точного вимірювання індукції магнітного поля використовувався тесламетр G 450 у комплекті з відповідним вимірювальним зондом.

Живлення сенсора Холла стабільним струмом забезпечувалося за допомогою програмованого джерела струму Keithley 220, а реєстрація вихідного сигналу здійснювалася високочутливим нановольтметром Keithley 2182. Додатково у вимірювальній схемі використовувався мультиметр Keithley 2000 для контролю допоміжних параметрів.

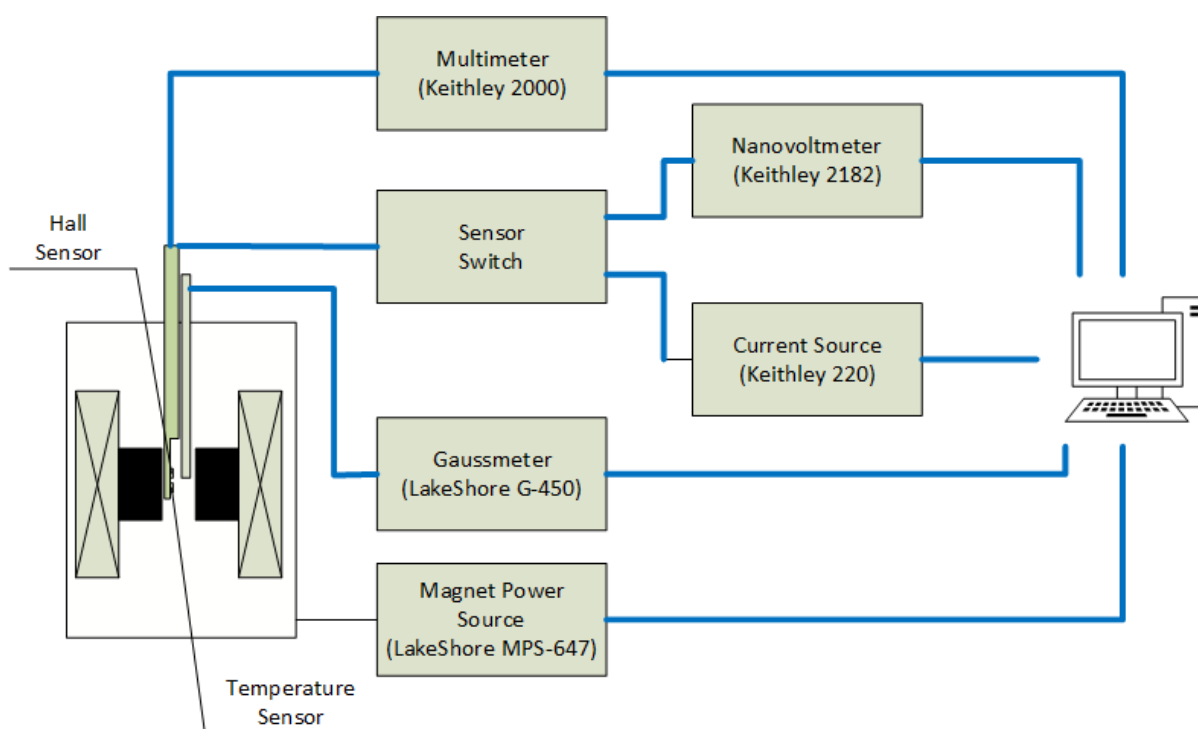


Рис. 1. Схема вимірювального стенду для дослідження польової залежності сигналів сенсорів Холла

Для обертання зразка у магнітному полі була розроблена спеціалізована механічна оснастка (рис. 2), яка забезпечує плавне обертання зразка в магнітному полі. Конструкція оснастки дозволяє здійснювати поворот сенсора Холла в межах 360° з дискретним кроком 5° .

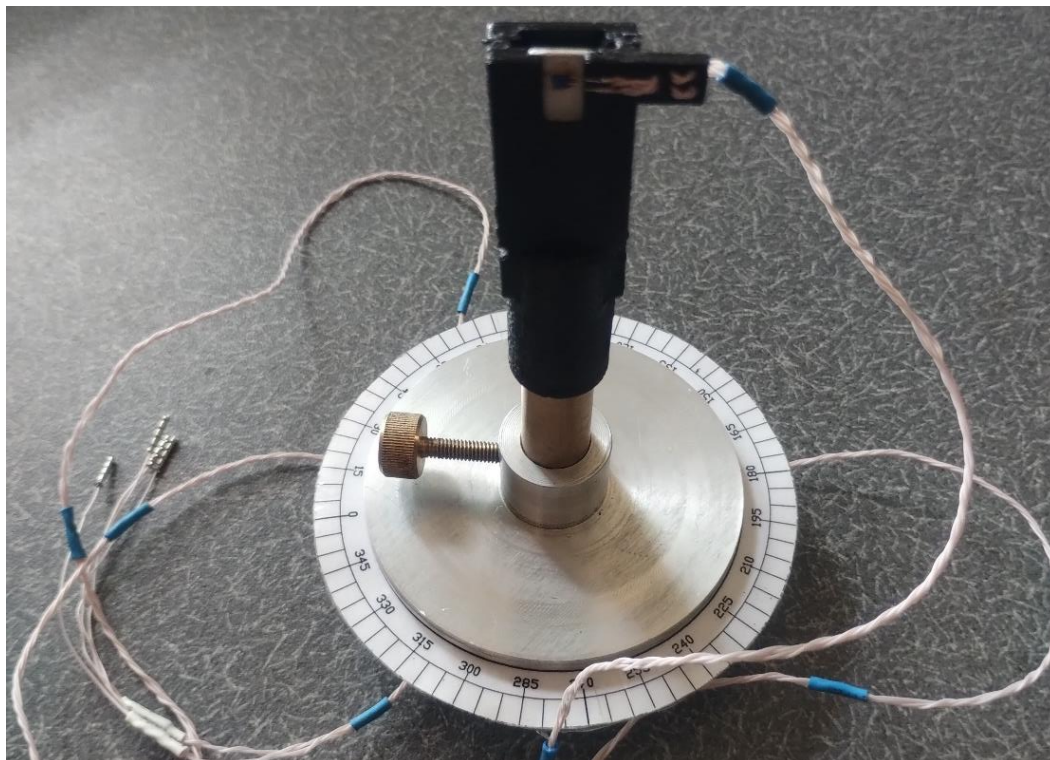


Рис.2. оснастка для обертання сенсора в магнітному полі

Оскільки для обертання сенсора між полюсами електромагніту потрібно більше простору ніж коли сенсор розміщений перпендикулярно до магнітного поля, нам довелося збільшити відстань між полюсами магніту, через це наше дослідження було обмежене полем 0,5Тл.

2. Алгоритми аналізу та обробки даних

Для цих досліджень сигнали сенсорів на QFS-графені вимірювали за допомогою алгоритму обертового струму (рис. 3) [19].

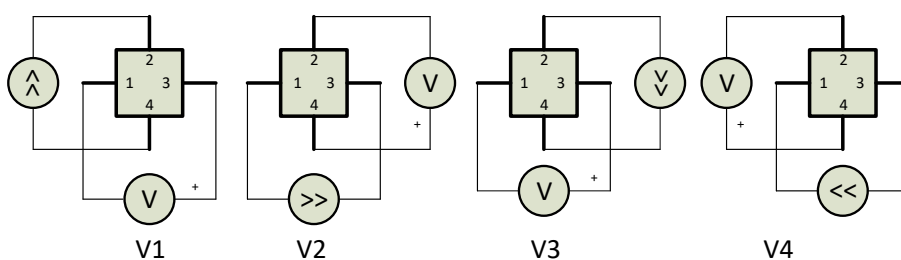


Рис. 3. Алгоритм обертаючого струму

Особливістю алгоритму приведеного вище є те, що після одержання результатів цих чотирьох вимірювань ми можемо розрахувати як холлівський сигнал:

$$V_H = \frac{V_1 + V_2 - V_3 - V_4}{4} \quad (1)$$

де V_H – усереднена напруга Холла, отримана методом обертання струму;
 V_1 – виміряна вихідна напруга в першій конфігурації;

V_2 – виміряна вихідна напруга в другій конфігурації;
 V_3 – виміряна вихідна напруга в третій конфігурації;
 V_4 – виміряна вихідна напруга в четвертій конфігурації.

Так і off-set сигнал:

$$V_0 = \frac{V_1 - V_2 - V_3 + V_4}{4} \quad (2)$$

де V_0 – напруга off-set сигналу;

V_1 – виміряна вихідна напруга в першій конфігурації;
 V_2 – виміряна вихідна напруга в другій конфігурації;
 V_3 – виміряна вихідна напруга в третій конфігурації;
 V_4 – виміряна вихідна напруга в четвертій конфігурації.

Залежність резистивних параметрів матеріалу від величини магнітного поля визначалась за методом ван дер Пау (рис. 4). Цей метод зручно застосовується як для визначення питомого опору об'ємних матеріалів, так і поверхневого опору 2D-матеріалів. Хоча висока точність вимірювань не є критичною, метод ван дер Пау дає змогу оцінити резистивні властивості плівкової структури сенсора Холла, виключаючи вплив опору вимірювальної лінії, що є його ключовою перевагою.

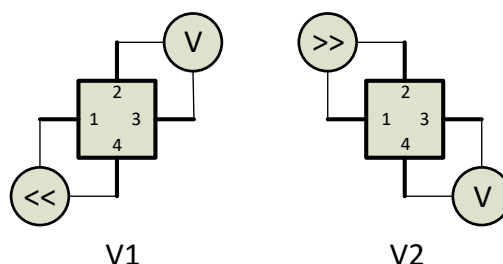


Рис. 4. Алгоритм ван дер Пау

Використовуючи вище наведений алгоритм, можна визначити поверхневий опір плівкової структури довільної форми за наступним рівнянням:

$$\rho = \frac{\pi}{\ln 2} \cdot \frac{R_1 + R_2}{2} \cdot f \quad (3)$$

де $R_1 = V_1/I_1$ опір, розрахований на основі виміряної напруги V_1 та струму I_1 ;
 $R_2 = V_2/I_2$ опір, розрахований на основі виміряної напруги V_2 та струму I_2 ;
 f – функція, що визначається геометрією досліджуваного зразка, і у випадку симетричної структури сенсора Холла, в першому наближенні може бути прийнята рівною одиниці.

Виходячи з припущення що плівкова структура сенсора демонструє магніторезистивні властивості, буде залежати від кута між нормаллю поверхні сенсора і магнітним потоком і буде описуватись гармонічним рівнянням виду:

$$R_s(\theta) = R_0 + \Delta R \cos^2 \theta \quad (4)$$

де $R_s(\theta)$ – поверхневий опір при куті θ ;
 R_0 – мінімальне значення опору;
 ΔR – амплітуда зміни опору;
 θ – кут між напрямком струму та вектором магнітної індукції.

3. Результати дослідження

Використовуючи описану вище експериментальну методику та

вимірювальне обладнання, було проведено дослідження польової залежності сигналів сенсорів Холла для десяти зразків на основі QFS-графену. Отримані результати наведені на (рис. 5 і рис. 6).

На (рис. 5) представлено залежність холлівського сигналу від зовнішнього магнітного поля для всіх досліджених зразків.

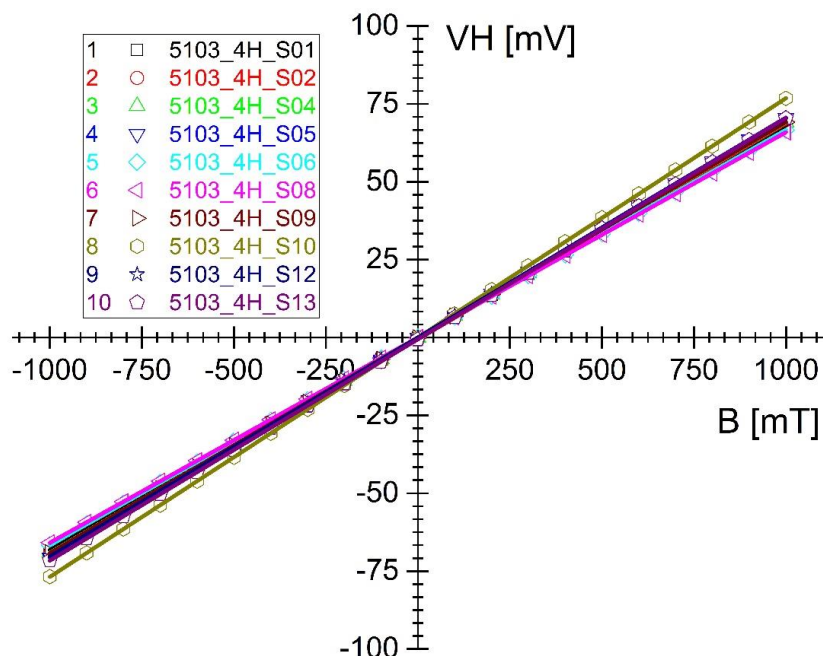


Рис. 5. Залежність холлівського сигналу від магнітного поля

Як видно з графіка, холлівський сигнал для всіх зразків демонструє чітко виражену лінійну залежність від магнітного поля, що є типовою для класичних Hall-пристроїв. Лінійна апроксимація описує експериментальні дані з високою точністю: середня похибка апроксимації становить лише 0,09 %, що свідчить про високу однорідність та стабільність транспортних характеристик QFS-графену.

Той факт, що відхилення від лінійності не перевищують десятих відсотка, вказує на те, що можливі фактори, які потенційно могли б спричинити нелінійність холлівського сигналу (такі як магніторезистивний внесок, неоднорідності листового опору, контактні асиметрії або зміна рухливості носіїв у полі), не мають суттєвого впливу на поведінку досліджених зразків. Це є додатковим підтвердженням того, що QFS-графен характеризується високою якістю, низьким рівнем дефектності та мінімальним магніторезистивним ефектом, що особливо важливо для використання в сенсорах Холла високої точності.

Узагальнюючи, отримані результати демонструють, що всі десять протестованих сенсорів на основі QFS-графену мають стабільну лінійну відгук, що робить їх перспективними кандидатами для застосувань у високопольових вимірювальних системах та магнітній діагностиці..

При проведенні досліджень було помічено, що паразитний off-set сигнал має певну залежність від магнітного поля. Через суттєвий розкид по величині off-set сигналу немає сенсу представляти таку залежність для всіх зразків на одному графіку, тому для демонстрації типової залежності off-set сигналу від магнітного поля представлені результати для зразка 5103_4H_S01 (рис. 6).

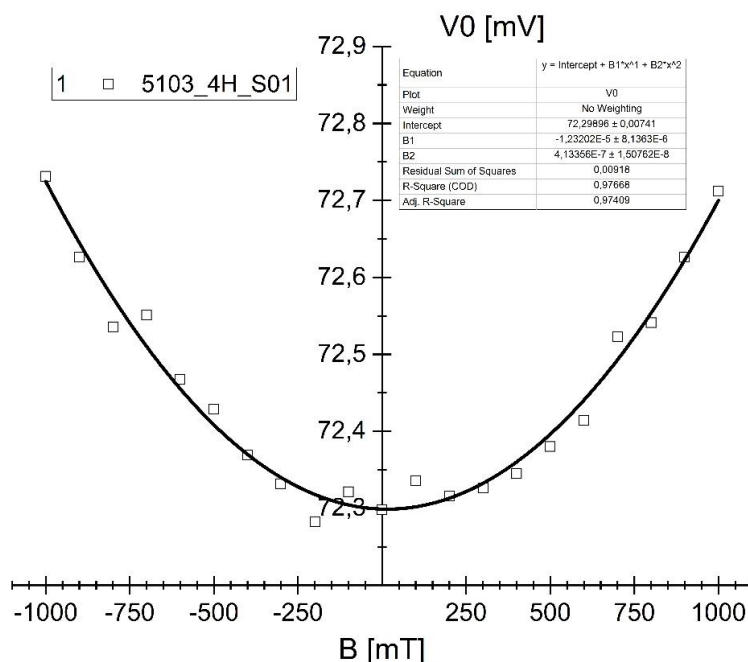


Рис. 6. Польова залежність off-set сигналу

Можна зауважити, що представлена на (рис. 6) залежність має квадратичний характер і добре описується рівнянням $y(x) = A \cdot x^2 + B \cdot x + C$. Така залежність є типовою для більшості зразків. В загальному, можна стверджувати, що польова залежність off-set сигналу для всіх зразків з кращою або гіршою точністю, але доволі добре описуються параболічним законом.

Очевидно, що така зміна off-set сигналу з магнітним полем пов'язана з магніторезистивним ефектом, оскільки фізична природа off-set сигналу є переважно резистивною. Off-set виникає внаслідок асиметрій геометрії, неоднорідностей провідності та контактних опорів, тобто факторів, які прямо впливають на розподіл струму в зразку. Коли зовнішнє поле викликає зміну опору матеріалу через магніторезистивні механізми, ці зміни трансформуються у додаткову різницю потенціалів між контактами, що й проявляється як польова залежність off-set сигналу.

Таким чином, квадратичний характер залежності є цілком очікуваним і узгоджується з класичними моделями магніторезистивної поведінки, де провідність матеріалу змінюється пропорційно B^2 у слабких та середніх магнітних полях. Узагальнюючи, можна стверджувати, що для більшості зразків паразитний off-set сигнал з достатньою точністю описується параболічним законом, що підтверджує його магніторезистивне походження та дозволяє враховувати цей ефект при подальшому аналізі та калібруванні сенсорів.

4. Дослідження магніторезистивних властивостей сенсорів Холла виготовлених на базі QFS графену

В ході проведення досліджень було виявлено, що опір QFS графенових сенсорів Холла залежить від магнітного поля, і магніторезистивний коефіцієнт (MR) має квадратичний характер (рис. 7).

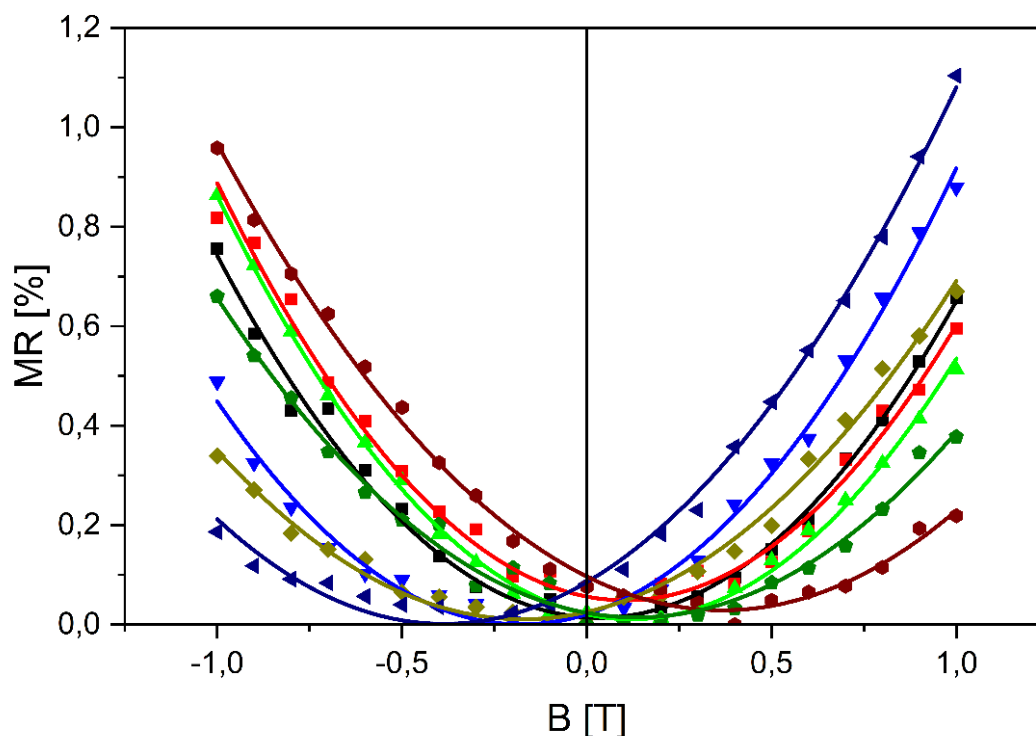


Рис. 7. Залежність MR коефіцієнту для QFS графенових сенсорів Холла від магнітного поля в межах -1Тл – 1Тл.

Отримані залежності добре узгоджуються з квадратичним законом (коефіцієнт детермінації R у середньому становить близько 0,97), що свідчить про високу якість апроксимації експериментальних даних. Водночас незначна несиметричність параболи відносно точки $B=0$ та малі відносні зміни опору (приблизно 1%) вказують на те, що спостережувана залежність може мати складнішу природу, ніж чисто магніторезистивний ефект.

В роботах інших науковців, що стосуються досліджень магніторезистивного ефекту в графені, помічений значно сильніший магніторезистивний ефект [20–24], який складає десятки відсотків. Однак, слід зазначити, що величина магнітоопору в графені залежить від таких факторів як температура, та концентрація вільних носіїв заряду. В роботі [22] показано, що для зразків графену з концентрацією носіїв заряду порядку $1 \cdot 10^{-12} \text{ см}^{-2}$ в діапазоні магнітних полів до 1Тл, магнітоопір змінюється в межах всього декілька відсотків. Зразки, що досліджувались в нашому експерименті мають концентрацію носіїв заряду приблизно $9 \cdot 10^{-12} \text{ см}^{-2}$. Враховуючи цей фактор, отримані нами результати кількісно узгоджуються з результатами інших авторів.

Для оцінки впливу магнітного поля на опір сенсорів Холла було проведено дослідження залежності поверхневого опору від орієнтації зразка у магнітному полі. Для цього зразки поміщали в однорідне магнітне поле з індукцією 0,5 Тл, здійснювали їх обертання з кроком 5° та фіксували зміни електрофізичних параметрів сенсорів.

Отримані експериментальні дані були нормалізовані відповідно до функції $\cos^2\theta$, що дозволяє оцінити, наскільки зміни опору відповідають класичній квадратичній залежності від кута повороту. Нормовані залежності опору для QFS-сенсорів Холла порівнювали з теоретичною функцією $y = \cos^2\theta$.

Розрахунок коефіцієнтів кореляції показав, що більшість отриманих залежностей не підпадають під класичну квадратичну закономірність. Найкраще узгодження спостерігалось для зразка 5103_4H-S01, для якого коефіцієнт кореляції становив приблизно $r \approx 0,5$.

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити висновок, що зміни магнітоопору в QFS-сенсорах Холла не можна повністю пояснити класичним магніторезистивним ефектом. Це свідчить про наявність інших механізмів, які впливають на електричний опір при обертанні зразків у магнітному полі, і підкреслює специфіку електронного транспорту у QFS графені.

Водночас із цим, ми зауважили, що для деяких зразків спостерігалася хороша кореляція з функцією $\cos(\theta)$ (рис. 8), причому коефіцієнт кореляції для двох таких зразків становив приблизно $r \approx 0,9$.

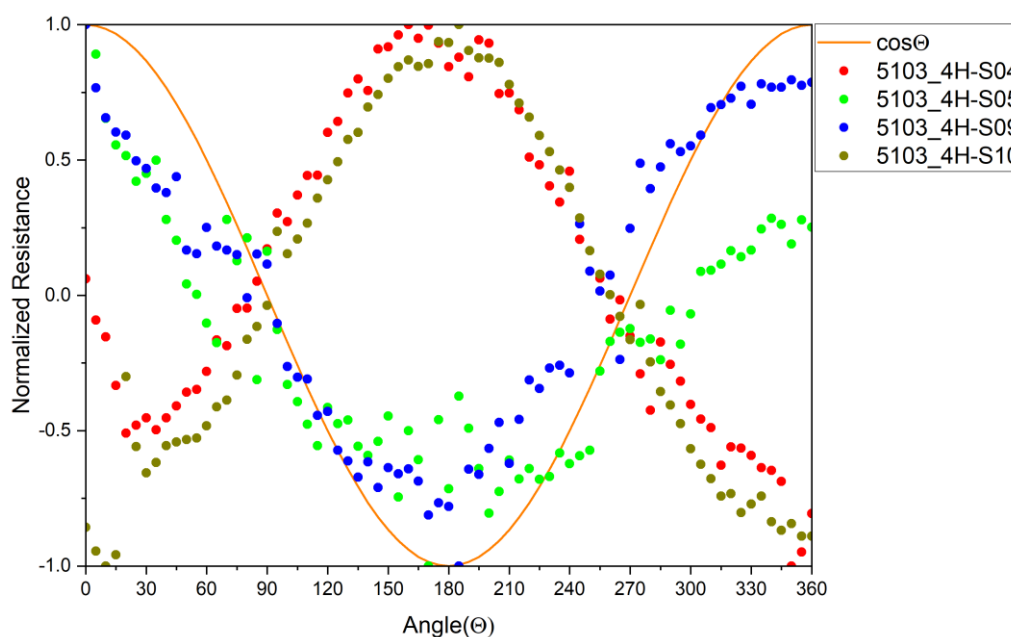


Рис.8. Залежності опору, приведенного до функції $\cos\theta$, від кута повороту зразків у магнітному полі.

Це узгоджується з літературними даними, згідно з якими графен не має власного феромагнітного впорядкування і характеризується слабкою спін-орбітальною взаємодією [25–27]. Тому анізотропний магніторезистивний ефект у чистому графені є незначним. Зміни опору графену під дією магнітного поля переважно зумовлені орбітальними ефектами: викривленням траєкторій руху носіїв заряду під дією сили Лоренца. Це призводить до гармонічної, косинусоїдальної залежності магніторезистивної відповіді від кута між напрямком магнітного поля та нормаллю до площини графену, тобто опір змінюється як функція $\cos(\theta)$. Аналогічні результати були отримані у роботах [28,29], де кутова залежність опору графенових сенсорів описувалася класичним орбітальним механізмом магніторезистивності.

Водночас для частини зразків було зафіксовано негативний магніторезистивний ефект (рис. 8), що корелює з $-\cos(\theta)$, із коефіцієнтом кореляції приблизно $r \approx 0,95$. Подібні явища раніше описували Zhou та співавтори [30], які досліджували транспорт у моношаровому графені з контрольованим

рівнем безладу, створеним іонним опроміненням. Руйнування монокристалічної структури та утворення нанокристалітів призводили до зміни знаку магніторезистивності, що пояснювалося зменшенням ймовірності розсіяння носіїв на межах зерен та можливим внеском дефект-індукованих магнітних моментів. Подібні результати спостерігали Iwasaki та співавтори [31], які показали, що негативна магніторезистивність у дефектному графені може проявлятися навіть при кімнатній температурі через пригнічення квантової інтерференції між локалізованими станами та стрибковий транспорт.

Для частини зразків магніторезистивного ефекту не спостерігалось. Ймовірною причиною є те, що прикладене магнітне поле 0,5 Тл виявилось недостатнім для помітного впливу на транспортні властивості цих структур. У такому випадку ефект може проявитися лише за вищих полів, коли радіус кривизни траєкторій носіїв порівняний із характерними розмірами зерен або неоднорідностей. Додатковим чинником є одночасна наявність електронної та діркової провідності поблизу точки Дірака. Як показано у роботі Martin та співавтори [32], у графені формуються так звані локальні області скупчень електронів і дірок, і навіть сенсори з однієї пластини можуть відрізнятися домінуючим типом провідності. У таких умовах внески обох типів носіїв можуть компенсувати один одного, що послаблює або повністю приховує прояв магніторезистивності.

Таким чином, аналіз показує, що зміни магніторезистивності в QFS-сенсорах Холла можуть бути як позитивними, так і негативними залежно від рівня дефектності та характеру носіїв, при цьому значна частина сенсорів демонструє класичну косинусоїдальну залежність, а інші – ефекти, пов'язані з високим рівнем структурного безладу.

5. Висновок

Проведено комплексне дослідження польової залежності сигналів сенсорів Холла на основі quasi-free-standing графену (QFS-графен) у магнітних полях до 0,5 Тл. Встановлено, що холлівський сигнал усіх досліджених зразків демонструє чітку лінійну залежність від величини магнітного поля, з середньою похибкою апроксимації лише 0,09 %. Це свідчить про високу однорідність і стабільність транспортних характеристик QFS-графену.

Паразитний off-set сигнал сенсорів Холла виявляє квадратичну залежність від магнітного поля, що корелює з магніторезистивним ефектом. Його величина та характер змін відображають асиметрії геометрії, неоднорідності провідності та контактні опори. Для більшості зразків залежність off-set сигналу добре описується параболічним законом, що підтверджує його резистивну природу.

Опір сенсорів Холла виявився чутливим до орієнтації зразка у магнітному полі. Це вказує на складну природу магніторезистивних ефектів у QFS-графені та специфіку електронного транспорту в даних структурах.

Для окремих зразків спостерігалася гармонічна, косинусоїдальна залежність магніторезистивності від кута між напрямком магнітного поля і нормаллю до площини графену ($r \approx 0,9$). Така поведінка пояснюється орбітальними ефектами та викривленням траєкторій носіїв заряду під дією сили Лоренца, що узгоджується з класичними моделями орбітальної магніторезистивності.

У деяких сенсорів було зафіксовано негативний магніторезистивний ефект, що корелює з $-\cos(\theta)$ ($r \approx 0,95$). Це явище пояснюється високим рівнем структурного безладу, розсіянням носіїв на межах нанокристалітів та впливом

скупчень електронів і дірок, що призводить до зміни знаку магніторезистивності та демонструє специфіку транспортних процесів у дефектному графені.

Встановлено, що частина сенсорів не проявляє значного магніторезистивного ефекту при полях 0,5 Тл. Це може бути пов'язано з недостатньою величиною магнітного поля для зміни радіусу кривизни траєкторій носіїв або компенсуванням внесків електронної та діркової провідності.

Загалом, дослідження підтвердило, що сенсори Холла на основі QFS-графену характеризуються високою стабільністю, лінійністю холлівського сигналу та мінімальним впливом паразитних магніторезистивних ефектів. Це робить їх перспективними для використання у високопольових вимірювальних системах, у тому числі для діагностики та контролю магнітних полів у термоядерних реакторах.

References

1. Novoselov K. S. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films / K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, A. A. Firsov // *Science*. – 2004. – Vol. 306, № 5696. – P. 666–669.
2. Castro Neto A. H. The electronic properties of graphene / A. H. Castro Neto, F. Guinea, N. M. R. Peres, K. S. Novoselov, A. K. Geim // *Rev. Mod. Phys.* – 2009. – Vol. 81, № 1. – P. 109–162.
3. Wu X. Weak Antilocalization in Epitaxial Graphene: Evidence for Chiral Electrons / X. Wu, X. Li, Z. Song, C. Berger, W. A. De Heer // *Phys. Rev. Lett.* – 2007. – Vol. 98, № 13. – P. 136801–136805.
4. Tzalenchuk A. Towards a quantum resistance standard based on epitaxial graphene / A. Tzalenchuk, S. Lara-Avila, A. Kalaboukhov, S. Paolillo, M. Syväjärvi, R. Yakimova, O. Kazakova, T. J. B. M. Janssen, V. Fal'ko, S. Kubatkin // *Nature Nanotech.* – 2010. – Vol. 5, № 3. – P. 186–189.
5. Xin N. Giant magnetoresistance of Dirac plasma in high-mobility graphene / N. Xin, J. Lourembam, P. Kumaravadivel, A. E. Kazantsev, Z. Wu, C. Mullan, J. Barrier, A. A. Geim, I. V. Grigorieva, A. Mishchenko, A. Principi, V. I. Fal'ko, L. A. Ponomarenko, A. K. Geim, A. I. Berdyugin // *Nature*. – 2023. – Vol. 616, № 7956. – P. 270–274. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.06863>.
6. Zhou B. Extraordinary magnetoresistance in high-quality graphene devices with daisy chains and Fermi-level pinning / B. Zhou, K. Watanabe, T. Taniguchi // *Phys. Rev. Applied*. – 2024. – Vol. 22, № 6. DOI: [10.1103/PhysRevApplied.22.064046](https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.22.064046).
7. Lukose R. Hybrid graphene-manganite thin film structure for magnetoresistive sensor application / R. Lukose, N. Žurauskienė, S. Balevicius, V. Stankevicius, S. Keršulis, V. Plausinaitiene, R. Navickas // *Nanotechnology*. – 2019. – Vol. 30, № 35. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ab201d>.
8. Klitzing K. V. New method for high-accuracy determination of the fine-structure constant based on quantized Hall resistance / K. V. Klitzing, G. Dorda, M. Pepper // *Phys. Rev. Lett.* – 1980. – Vol. 45, № 6. – P. 494–497.
9. Tsui D. C. Two-Dimensional Magnetotransport in the Extreme Quantum Limit / D. C. Tsui, H. L. Stormer, A. C. Gossard // *Phys. Rev. Lett.* – 1982. – Vol. 48, № 22. – P. 1559–1562. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.48.1559>.
10. Baibich M. N. Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattices / M. N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert, F. N. Van Dau, F. Petroff, P. Etienne, G. Creuzet, A. Friederich, J. Chazelas // *Phys. Rev. Lett.* – 1988. – Vol. 61, № 21. – P. 2472–2475.

11. Binasch G. Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange / G. Binasch, P. Grünberg, F. Saurenbach, W. Zinn // *Phys. Rev. B.* – 1989. – Vol. 39, № 7. – P. 4828–4830.
12. Xu W. High sensitivity magnetic field sensing via a sandwich-type polydimethylsiloxane resonator / W. Xu, J. Rong, E. Xing, J. Li, T. Jia, J. Yue, D. Wang, J. Tang, J. Liu // *Opt. Eng.* – 2023. – Vol. 62, № 5. P. 12244.
13. Biel W. Development of a concept and basis for the DEMO diagnostic and control system / W. Biel, M. Ariola, I. Bolshakova, K. J. Brunner, M. Ceconello, I. Duran, Th. Franke, L. Giacomelli, L. Giannone, F. Janky, A. Krimmer, R. Luis, A. Malaquias, G. Marchiori, O. Marchuk, D. Mazon, A. Pironti, A. Quercia, N. Rispoli, S. E. Shawish, M. Siccino, A. Silva, C. Sozzi, G. Tartaglione, T. Todd, W. Treutterer, H. Zohm // *Fusion Engineering and Design.* – 2022. – Vol. 179. – P. 113122.
14. Strikha M. V. Physics Of Graphene: Status And Perspectives / M. V. Strikha // *Sensor Electronics and Microsystem Technologies.* – 2010. – Vol. 7, № 3. – P. 5-13.
15. Ciuk T. High-Temperature Thermal Stability of a Graphene Hall Effect Sensor on Defect-Engineered 4H-SiC(0001) / T. Ciuk, C. Nouvellon, F. Monteverde, B. Stańczyk, K. Przyborowska, D. Czołak, S. El-Ahmar // *IEEE Electron Device Lett.* – 2024. – Vol. 45, № 10. – P. 1957–1960. DOI: [10.1109/LED.2024.3436050](https://doi.org/10.1109/LED.2024.3436050).
16. Dauber J. Ultra-sensitive Hall sensors based on graphene encapsulated in hexagonal boron nitride / J. Dauber, A. A. Sagade, M. Oellers, K. Watanabe, T. Taniguchi, D. Neumaier, C. Stampfer // *Applied Physics Letters.* – 2015. – Vol. 106, no. 19. – P. 193501. <https://doi.org/10.1063/1.4919897>.
17. Shuryhin F. Investigation of graphene-metal contacts in Hall sensors based on QFS graphene / F. Shuryhin, R. Biliak, N. Liakh-Kaguy, Y. Kost, S. Sukhorebryi, T. Ciuk, S. El-Ahmar // *Molecular Crystals and Liquid Crystals.* – 2025. – P. 1–9.
18. Shuryhin F. M. Temperature Dependence of the Graphene Hall Sensor for Special Applications / F. M. Shuryhin, R. V. Biliak, N. S. Liakh-Kaguy, Y. Y. Kost, S. P. Sukhorebryi, T. Ciuk, S. El-Ahmar // *Visnyk NTUU KPI. Seriya Radiotekhnika Radioaparobuduvannia.* – 2025. – Vol. 100. – C. 59–66.
19. Munter P. J. A. A low-offset spinning-current hall plate / P. J. A. Munter // *Sensors and Actuators A: Physical.* – 1990. – T. 22, № 1–3. – P. 743–746.
20. Hu J. Room-Temperature Colossal Magnetoresistance in Terraced Single-Layer Graphene / J. Hu, J. Gou, M. Yang, G. J. Omar, J. Tan, S. Zeng, Y. Liu, K. Han, Z. Lim, Z. Huang, A. T. S. Wee, A. Ariando // *Advanced Materials.* – 2020. – Vol. 32, № 37. – P. 2002201. <https://doi.org/10.1002/adma.202002201>.
21. Zhou B. Extraordinary magnetoresistance in encapsulated monolayer graphene devices / B. Zhou, K. Watanabe, T. Taniguchi, E. A. Henriksen // *Appl. Phys. Lett.* – 2020. – Vol. 116, № 5. – P. 053102. <https://doi.org/10.1063/1.5142021>.
22. Chuang C. Linear magnetoresistance in monolayer epitaxial graphene grown on SiC / C. Chuang, Y. Yang, R. E. Elmquist, C.-T. Liang // *Materials Lett.* – 2016. – Vol. 174. – P. 118–121.
23. Chuang C. Magnetoresistance of Ultralow-Hole-Density Monolayer Epitaxial Graphene Grown on SiC / C. Chuang, C.-W. Liu, Y. Yang, W.-R. Syong, C.-T. Liang, R. Elmquist // *Materials.* – 2019. – Vol. 12, № 17. – P. 2696.
24. Sevak Singh R. Addendum: “Large room-temperature quantum linear magnetoresistance in multilayered epitaxial graphene” [Appl. Phys. Lett. 101, 183105 (2012)] / R. Sevak Singh, X. Wang, W. Chen, Ariando, A. T. S. Wee // *Appl. Phys. Lett.* – 2013. – Vol. 103, № 4. – P. 049902. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4816727>.
25. Han W. *Spintronics Handbook: Spin Transport and Magnetism*, Second

Edition / Wei Han, Ronald Kawakami – Boca Raton : Taylor & Francis, CRC Press, 2019. – 43 p.

26. Sahoo K. R. Room-temperature ferromagnetic wide bandgap semiconducting fluorinated Graphene-hBN vertical heterostructures / K. R. Sahoo, R. Sharma, S. Bawari, S. Vivek, P. K. Rastogi, S. S. Nair, S. L. Grage, T. N. Narayanan // *Materials Today Physics*. – 2021. – Vol. 21. – P. 100547. [10.1016/j.mtphys.2021.100547](https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2021.100547)

27. Wang Z. Proximity-Induced Ferromagnetism in Graphene Revealed by the Anomalous Hall Effect / Z. Wang, C. Tang, R. Sachs, Y. Barlas, J. Shi // *Phys. Rev. Lett.* – 2015. – Vol. 114, № 1. – C. 016603.

28. Huang S. Giant magnetoresistance induced by spin-dependent orbital coupling in Fe₃GeTe₂/graphene heterostructures / S. Huang, L. Zhu, Y. Zhao, K. Watanabe, T. Taniguchi, J. Xiao, L. Wang, J. Mei, H. Huang, F. Zhang, M. Wang, D. Fu, R. Zhang // *Nat Commun.* – 2025. – Vol. 16, № 1. – P. 2866.

29. Žurauskienė N. Hybrid manganite-graphene sensor for magnetic field magnitude and direction measurement / N. Žurauskienė, V. Stankevič, S. Keršulis, V. Vertelis, M. Koliada, V. Rudokas, M. Skapas, M. Vagner, V. Plaušinitienė, A. Guobienė, Š. Meškinis // *Sci Rep.* – 2025. – Vol. 15, № 1. – P. 9100.

30. Zhou Y.-B. From positive to negative magnetoresistance in graphene with increasing disorder / Y.-B. Zhou, B.-H. Han, Z.-M. Liao, H.-C. Wu, D.-P. Yu // *Appl. Phys. Lett.* – 2011. – Vol. 98, № 22. – P. 222502.

31. Iwasaki T. Room-temperature negative magnetoresistance of helium-ion-irradiated defective graphene in the strong Anderson localization regime / T. Iwasaki, S. Nakamura, O. G. Agbonlahor, M. Muruganathan, M. Akabori, Y. Morita, S. Moriyama, S. Ogawa, Y. Wakayama, H. Mizuta, S. Nakaharai // *Carbon*. – 2021. – Vol. 175. – P. 87–92.

32. Martin J. Observation of electron–hole puddles in graphene using a scanning single-electron transistor / J. Martin, N. Akerman, G. Ulbricht, T. Lohmann, J. H. Smet, K. Von Klitzing, A. Yacoby // *Nature Phys.* – 2008. – Vol. 4, № 2. – P. 144–148.

Надійшла до редакції 10.11.2025, розглянута на редколегії 18.11.2025

The influence of a magnetic field on the electrical parameters of QFS-graphene Hall sensors

In this work, a comprehensive study of the field and magnetoresistive properties of Hall sensors based on quasi-free-standing (QFS) graphene was conducted to assess their stability and performance in strong magnetic fields. Graphene-based Hall sensors attract significant attention due to the unique electronic properties of the material, including high carrier mobility, two-dimensional structure, and quantum nature of conductivity, which enable record-high sensitivity and magnetoresistance. Special attention was given to QFS graphene, which is characterized by low defect density and minimal magnetoresistive effects, making it promising for the development of high-precision Hall sensors. For the experimental investigations, the Hall sensors were fabricated as thin-film structures with a uniform layer of QFS graphene. Measurements were carried out using a specialized setup with an electromagnet capable of generating a controlled magnetic field up to ± 0.5 T, and precise signal registration was ensured by highly sensitive nanovoltmeters. The samples were rotated in the magnetic field in 5° increments to study the angular dependence of

resistance and the Hall signal, and the results were normalized according to the theoretical functions $\cos\theta$ and $\cos^2\theta$ to evaluate conformity with classical magnetoresistive behavior. The results showed that the Hall signal of QFS-graphene Hall sensors exhibits a clearly linear dependence on the magnetic field with high approximation accuracy (average error $\approx 0.09\%$), indicating material homogeneity and stable electronic transport. The parasitic offset signal was found to depend on the magnetic field and exhibited primarily quadratic behavior, suggesting a magnetoresistive origin. This dependence is explained by the influence of magnetoresistive mechanisms on the resistive nature of the offset signal, particularly through geometric asymmetries, conductivity inhomogeneities, and contact resistances, which alter the current distribution in the sample under an external field. Analysis of the angular dependence of sheet resistance showed that, for most samples, the magnetoresistive effect did not follow the classical quadratic $\cos^2\theta$ dependence, while some sensors exhibited a harmonic, cosinusoidal dependence in good agreement with the theoretical $\cos\theta$ function, corresponding to the orbital mechanism of magnetoresistance in graphene. For some samples, a negative magnetoresistive effect was observed, correlating with $-\cos\theta$, which aligns with literature data on the influence of defects and carrier localization on the sign of magnetoresistance. Additional factors, such as the simultaneous presence of electron and hole conduction and the influence of local electron and hole regions, may compensate contributions from different carriers, weakening the manifestation of magnetoresistance at low magnetic fields. The obtained results demonstrate that QFS-graphene Hall sensors combine high sensitivity, linear response, and minimal magnetoresistive effects, making them promising for applications in high-field measurement systems, magnetic diagnostics, and thermonuclear reactor control systems. This study allows for refinement of the design principles for Hall sensors in extreme magnetic field conditions, considering the influence of structural disorder and orbital effects on electronic transport in graphene.

Keywords: Hall sensors, graphene, magnetoresistance, magnetic fields, sheet resistance, spinning current method.

Відомості про авторів:

Біляк Роман Васильович – аспірант, кафедра напівпровідникової електроніки, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна. e-mail: roman.v.biliak@lpnu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-8848-8606>.

Лях-Кагуй Наталія Степанівна – доктор технічних наук, професор, кафедра напівпровідникової електроніки, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна. e-mail: nataliia.s.liakh-kahui@lpnu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1791-6053>.

About the Authors:

Biliak Roman – PhD student, Department of Semiconductor Electronics, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine. E-mail: roman.v.biliak@lpnu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-8848-8606>.

Liakh-Kahui Nataliia – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Semiconductor Electronics, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine. e-mail: nataliia.s.liakh-kahui@lpnu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1791-6053>.