

СЕНСОРИ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН

PHYSICAL SENSORS

УДК 539.2

DOI 10.18524/1815-7459.2021.3.241056

ЗАЛЕЖНІСТЬ МАКСИМАЛЬНОЇ ЧУТЛИВОСТІ ХОЛЛІВСЬКИХ СЕНСОРІВ МАГНІТНИХ ПОЛІВ НА ОСНОВІ ГРАФЕНУ ВІД ТЕМПЕРАТУРИ

I. Большакова¹, М. Стріха^{2,3}, Я. Кость¹, Ф. Шуригін¹, Ю. Мухащук¹, Z. Wang⁴, D. Neumaier⁴

1 – Національний університет «Львівська політехніка», Лабораторія магнітних сенсорів,
вул. Котляревського 1, м. Львів, Україна e-mail: inessa.bolshakova@gmail.com

2 – Київський національний університет ім. Тараса Шевченка, факультет радіофізики,
електроніки і комп'ютерних систем, пр. Глушкова, 4г, Київ, Україна;

3 – Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України, пр. Науки, 41,
Київ, Україна. E-mail: maksym_strikha@hotmail.com

4 – Advanced Microelectronic Center Aachen (AMICA), Otto-Blumenthal-Str. 2552074 Aachen,
Germany. E-mail: wang@amo.de

ЗАЛЕЖНІСТЬ МАКСИМАЛЬНОЇ ЧУТЛИВОСТІ ХОЛЛІВСЬКИХ СЕНСОРІВ МАГНІТНИХ ПОЛІВ НА ОСНОВІ ГРАФЕНУ ВІД ТЕМПЕРАТУРИ

I. Большакова, М. Стріха, Я. Кость, Ф. Шуригін, Ю. Мухащук, Z. Wang, D. Neumaier

Анотація. Викладено теорію чутливості холлівських сенсорів магнітних полів на основі графену в залежності від температури. Прогнозовано наявність низькотемпературної ділянки з незалежною від температури чутливістю з подальшим її спадом зі зростанням температури тоді, коли температурно-індукована концентрація носіїв в графені починає переважати. Проведені експериментальні дослідження температурної залежності магнітної чутливості за струмом сенсорів Холла на основі одношарового графену в інтервалі від 300° К до 430° К. Залежність якісно відповідає прогнозованій з теоретичного розгляду з початком спаду чутливості при $T > 400$ К. Отримані значення чутливості в області кімнатних температур $\sim 230 \text{ В} \cdot \text{А}^{-1} \cdot \text{Тл}^{-1}$ суттєво перевищують максимальну чутливість традиційних холлівських сенсорів на основі кремнію $\sim 100 \text{ В} \cdot \text{А}^{-1} \cdot \text{Тл}^{-1}$.

Ключові слова: Сенсор магнітного поля, ефект Холла, чутливість, графен, температура

DEPENDENCE OF MAXIMAL SENSITIVITY OF THE MAGNETIC FIELD HALL SENSORS BASED ON GRAPHENE ON TEMPERATURE

I. Bolshakova, M. Strikha, Ya. Kost, F. Shurygin, Yu. Mykhashchuk, Z. Wang, D. Neumaier

Abstract. A theory of graphene-based magnetic field Hall sensors sensitivity dependence on temperature is summarized. The existence of low-temperature range with sensitivity, almost independent on temperature, is predicted; at higher temperatures, when thermally-induced carrier concentration in graphene prevails, the sensitivity decreases with temperature. The experimental studies of the temperature dependence of magnetic sensitivity of Hall sensors on single layer graphene base were carried in temperature range from 300 °K to 430 °K. The values of sensitivity, obtained for room temperatures $\sim 230 \text{ V}\cdot\text{A}^{-1}\cdot\text{T}^{-1}$ exceed essentially the maximum sensitivity of the traditional Hall sensors on silicon base $\sim 100 \text{ V}\cdot\text{A}^{-1}\cdot\text{T}^{-1}$.

Keywords: Magnetic field sensor, Hall effect, sensitivity, graphene, temperature

ЗАВИСИМОСТЬ МАКСИМАЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ХОЛЛОВСКИХ СЕНСОРОВ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ОСНОВЕ ГРАФЕНА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

I. Bolshakova, M. Strikha, Ya. Kost, F. Shurygin, Yu. Mykhashchuk, Z. Wang, D. Neumaier

Аннотация. Изложена теория чувствительности холловских сенсоров магнитных полей на основе графена в зависимости от температуры. Прогнозировано наличие низкотемпературной области с независимой от температуры чувствительностью с дальнейшим ее спадом с ростом температуры тогда, когда температурно-индуцированная концентрация носителей в графене начинает превалировать. Проведены экспериментальные исследования температурной зависимости магнитной чувствительности по току сенсоров Холла на основе однослойного графена в интервале температур от 300 °K до 430 °K. Полученные значения чувствительности в области комнатных температур $\sim 230 \text{ В}\cdot\text{А}^{-1}\cdot\text{Тл}^{-1}$ существенно превышают максимальную чувствительность традиционных холловских сенсоров на основе кремния $\sim 100 \text{ В}\cdot\text{А}^{-1}\cdot\text{Тл}^{-1}$.

Ключевые слова: Сенсор магнитного поля, эффект Холла, чувствительность, графен, температура

1. Вступ

Протягом останніх років триває активне дослідження магнітних сенсорів на основі графену [1–4]. Інтерес до них зумовлено тим, що обсяг світового ринку магнітних сенсорів досягне за оцінками експертів у 2022 р. 4,16 млрд. доларів США, а самі ці сенсори широко використовуються сьогодні в побутовій електроніці, автомобільній промисловості, охороні здоров'я та в військовій сфері. При цьому понад 55% цього ринку складають сенсори, базовані на ефекті Холла.

Ключовим питанням для чутливості таких сенсорів є висока рухливість носіїв. З цього погляду надзвичайно перспективним

є застосування вперше отриманого в 2004 році графену [5]. Як відомо, у структурно досконалему графені рухливість електронів може скласти близько [6]. На даний час створено холлівські сенсори на основі графену, інкапсульованого в нітриді бору, з рекордною чутливістю за струмом $5700 \text{ В}\cdot\text{А}^{-1}\cdot\text{Тл}^{-1}$ і за напругою близько $3 \text{ В}\cdot\text{В}^{-1}\cdot\text{Тл}^{-1}$ [11]. Межа чутливості для реальних графенових сенсорів, що вже випускаються промисловістю, вдвічі нижча ($\sim 3000 \text{ В}\cdot\text{А}^{-1}\cdot\text{Тл}^{-1}$, [7]), але однак суттєво перевищує чутливість холлівських сенсорів на основі кремнію ($100 \text{ В}\cdot\text{А}^{-1}\cdot\text{Тл}^{-1}$), отриманих технологією CMOS з використанням матеріалів, отриманих технологією CMOS.

Наведені дані стосуються кімнатних температур, проте в ряді випадків важливо мати робочі сенсори, здатні працювати при суттєво підвищених температурах. Метою цієї роботи є оцінка теоретичних меж чутливості таких сенсорів та порівняння цих результатів з експериментальними даними.

2. Теоретична модель

Надалі розглядатимемо стандартну топографію холлівського сенсора, де струм протікає між виток (S) і сток (D), холлівська напруга знімається між двома холлівськими контактами, а прикладанням напруги до затвору (G) можна «легувати» канал провідності. У такому випадку [1] холлівська напруга стандартно записується через струм I , напруженість магнітного поля B і чутливість сенсора за струмом S_I :

$$\begin{aligned} V_H &= S_I B, \\ S_I &= \frac{1}{I} \left. \frac{\partial V_H}{\partial B} \right|_{I=const}. \end{aligned} \quad (1)$$

У роботі [1] отримано формулу для чутливості сенсора для випадку, коли рівень Фермі в графеновому каналі перебуває в околі точки Дірака:

$$S_I = -\frac{\alpha}{e} \frac{n(V_g)}{n^2(V_g) + n_o^2}. \quad (2)$$

У цьому виразі α – множник порядку одиниці, що залежить від фактора Холла та геометрії зразку, e – заряд електрона:

$$n(V_g) = -\frac{C_{ox}}{e} (V_g - V_o) \quad (3)$$

– концентрація носіїв у графеновому каналі, обумовлена «легуванням» напругою на затворі V_g (C_{ox} – підзатворна ємність, V_o – напруга на затворі, якій відповідає проходження рівня Фермі через точку Дірака; для структурно досконалого графену вона дорівнює нулю);

$$n_o = n_i + n_q \quad (4)$$

– концентрація так званих «залишкових» носіїв, яка не залежить від напруги на затворі, і обумовлена як термічними перекидами з валентної зони в зону провідності (n_i – концентрація власних носіїв), так і суто квантовими причинами (відомо, що навіть за нульової температури в структурно досконалому графені наявні $n_q \approx 10^{11}$ см⁻² електронів і дірок, поява яких, як вважають, зумовлена наявністю виступів і западин у графеновій площині, які обумовлюють мінімальну провідність порядку e^2/h ; величина такої провідності збільшується для деформованого графену [8]).

Як випливає із залежності (2), чутливість сенсора досягає максимуму за абсолютною величиною за умови

$$n(V_g) = \pm n_o. \quad (5)$$

Цьому випадку відповідає максимальне значення чутливості

$$S_I^{\max} = \frac{\alpha}{2en_o}. \quad (6)$$

З (6) видно, що максимальну чутливість сенсора визначає кількість «залишкових» носіїв (4), що її не можна «занулити» вибором оптимальної напруги на затворі.

Концентрація власних електронів і дірок у графені дорівнює [6, 9]

$$n_i = \frac{\pi}{6} \left(\frac{kT}{\hbar v_F} \right)^2. \quad (7)$$

Тут k – стала Больцмана, $v_F = 10^6$ м/с – т.зв. швидкість Фермі у графені [8]. Відзначмо, що (7) одержано в припущенні рівноважної функції розподілу, що накладає надалі обмеження малої різниці напруг між витком і стоком [10] (яке, однак, добре виконується для сенсорів).

Теоретична оцінка максимальної струмової чутливості сенсорів Холла на основі одношарового графену досягає порядку 10^4 В·А⁻¹·Тл⁻¹, що на порядки перевищує чутливість сенсорів на основі напівпровідникових та металевих матеріалів.

Температурну залежність чутливості (6) можемо переписати як

$$S_I^{\max} = \frac{A}{1 + BT^2}; A = \frac{\alpha}{2en_q}; B = \frac{\pi k^2}{6n_q (\hbar v_F)^2}. \quad (8)$$

Для $T = 300$ К, концентрація рівноважних електронів і дірок складає близько $8 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ [8], і для кімнатної температури обидві складові концентрації, що входять до правої частини виразу (4), є величинами одного порядку. Але при високих температурах $T > B^{-1/2}$ перша складова концентрації починає переважати над другою, і максимальна чутливість сенсора зменшується як $1/T^2$.

3. Порівняння з експериментом

3.1. Загальна експериментальна ситуація

На сьогодні основні параметри виготовлених холлівських сенсорів відрізняються на порядки величин. Наприклад, струмова чутливість сенсорів на графені, інкапсульованому в гексагональному нітриді бору (hBN) становить при кімнатній температурі $S_I = 5700 \text{ В} \cdot \text{А}^{-1} \cdot \text{Тл}^{-1}$ [11], а для CVD графену на підкладці SiO_2/Si досягає $2745 \text{ В} \cdot \text{А}^{-1} \cdot \text{Тл}^{-1}$ [2]. В той же час струмова чутливість в епітаксійно вирощеному графені на напівізолюючій підкладці 4H – SiC(0001) становить лише $80 \text{ В} \cdot \text{А}^{-1} \cdot \text{Тл}^{-1}$. Визначена в наявних у літературі роботах температурна залежність чутливості в діапазоні температур ($300 \div 573$) К є спаданою, що якісно відповідає проведеному вище аналізу. Температурний коефіцієнт такої залежності в грубому лінійному наближенні, використаному попередніми авторами, було оцінено як $-0,02\%/K$, а при ще більш підвищених температурах в інтервалі ($573 \div 770$) К як $-0,06\%/K$ [3].

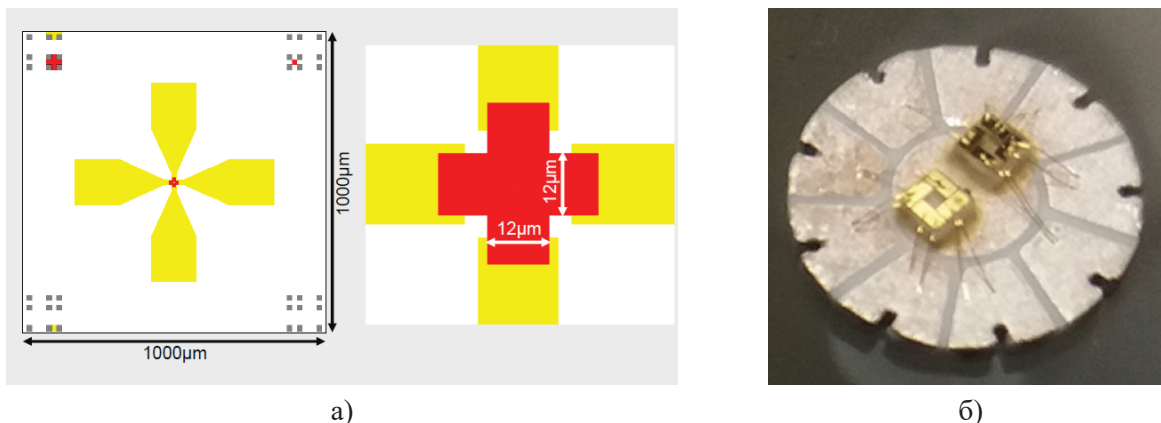
3.2. Технологічні особливості виготовлення сенсорів Холла на основі одношарового графену.

Параметри графенових сенсорів Холла, визначені експериментальним шляхом, залежать від технологічних підходів як до

створення самого матеріалу графену, так і до матеріалів підкладки та процесу пасивації, а також від технологічних особливостей створення омичних контактів метал – графен.

В нашій роботі досліджувались зразки одношарового графену, що були виготовлені груповим методом в центрі Advanced Microelectronic Center Aachen (AMICA), Німеччина. Вирощування одношарового графену відбувалося методом CVD при осадженні на мідній фользі. Подальший технологічний процес виготовлення сенсорів Холла передбачав перенесення моноатомного шару графену на сапфірову підкладку товщиною ($400 \div 500$) мкм. Формування структури сенсора Холла проводилося за стандартною тонкоплівковою технологією з використанням фотолітографії, фоторезисту AZ 5214 та установки суміщення. Травлення графену здійснювалося шляхом застосування кисневої плазми через маску фоторезисту. Створення структури золотих контактних площадок проводилося методом магнетронного напилення. Проміжний шар титану (Ti) використовувався для покращення адгезії між підкладкою та контактною площадкою, що забезпечує кращі адгезійні властивості структури контактів. Формування контактних площадок здійснювалося методом підривної літографії. Після цього проводилася пасивація графену тонким шаром (80 нм) Al_2O_3 за допомогою методу ALD (atomic layer deposition, атомного пошарового осаджування).

Топологія чутливого елемента була сформована у формі хреста (Рис. 1, а), що традиційно використовується при виготовленні сенсорів Холла. Така топологія має симетричну геометрію і дозволяє ефективно застосовувати алгоритмічні методи пригнічення паразитного off-set сигналу на $3 \div 4$ порядки [12]. Для виготовлення сенсорів Холла з чутливих елементів на основі моношарового графену використовувалась спеціальна установка ультразвукового приварювання HB05 ТРТ для приєднання виводів (золотих дротинків товщиною 30 мкм) до золотих контактних площадок.



а) б)
Рис. 1. Сенсор Холла на основі одношарового графену.
а – топологія; б – розміщення на керамічному тримачі

3.3. Обладнання для проведення досліджень.

Дослідження електрофізичних параметрів одношарового графену проводилося з використанням методів холлівських вимірювань та методу ван дер Пау. Холлівська напруга визначалася за двома різними алгоритмами: традиційний метод та метод обертаючого струму. Відомо, що оптимальним алгоритмом для виділення холлівського сигналу є традиційний метод (вимірювання сигналу сенсора при двох напрямках поля та двох напрямках струму). Такий метод дозволяє позбутися практично всіх паразитних сигналів, пов'язаних з іншими ефектами, що можуть виникати в матеріалі при протіканні струму та зміні температури. Однак, такий метод не може бути використаний в магнітовимірювальних приладах через необхідність змінювати напрямок магнітного поля. Паразитний off-set сигнал вимірювався на двох різних парах виводів сенсора Холла при двох різних напрямках струму, з подальшим усередненням результату вимірювань. Поверхневий опір визначався за методом ван дер Пау.

Для проведення дослідження параметрів зразки сенсорів Холла на основі одношарового графену були розміщені на керамічних тримачах (Рис. 1, б). Керамічні тримачі містять площадки для розварювання виводів, виготовлені з пасти AgPt, що пройшла термічну обробку.

Дослідження проводились при кімнатній та підвищених температурах. Холлівські вимірювання та вимірювання за методом ван дер Пау проводили при керуючому струмі через сенсор 100 μA . Основні результати дослідження параметрів сенсорів: стала Холла – $(8 \cdot 10^5 \div 3 \cdot 10^6) \text{ см}^3/\text{Кл}$, концентрація носіїв заряду – $(2 \cdot 10^{12} \div 8 \cdot 10^{12}) \text{ см}^{-2}$, рухливість – $(500 \div 2500) \text{ см}^2/\text{В/с}$, чутливість до магнітного поля за струмом – $(100 \div 300) \text{ В} \cdot \text{А}^{-1} \cdot \text{Тл}^{-1}$, поверхневий опір – $(1 \div 2,5) \text{ кОм/квдрат}$.

3.4. Температурна залежність чутливості сенсорів Холла на основі одношарового графену

Дослідження температурної залежності сигналів проводили в інтервалі температур від 303 К до 433 К. Результати дослідження для одного з типових зразків зображені на рис. 2.

Як видно з рис. 2, значення температурного коефіцієнту чутливості досліджуваних сенсорів в інтервалі температур до 400 К становить $(0,03 \div 0,05)\%/K$, що за порядком величини відповідає даним в роботі [3]. При температурах вищих за 400 К починається різке зменшення чутливості. Подібний спад чутливості із ростом температури спостерігався і в роботі [3], однак при значно вищих температурах: 570 К та 770 К.

Слабка залежність чутливості від T в інтервалі температур до 400 К може бути пов'язана з тим, що для порівняно невисоких

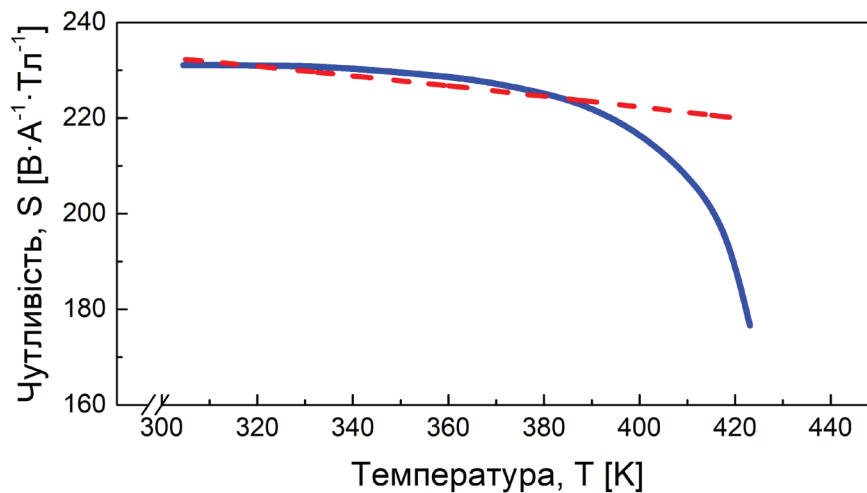


Рис. 2. Температурна залежність чутливості графенового сенсора Холла. Суцільна крива – експеримент, пунктирна – теорія за (8) при $n_q = 1,02 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$

температур у правій частині виразу (4) переважає другий, незалежний від температури доданок. При припасовуванні значення чутливості для кімнатної температури до формули (8) можна одержати значення $n_q = 1,02 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Це дозволяє очікувати згідно з (8) початку суттєвого спаду чутливості з температурою як $1/T^2$ починаючи з температур порядку 800 К (як це й мало місце в [3]). Однак експеримент показує, що помітне зниження чутливості відбувається вже при температурах, вищих від 400 К. Цю розбіжність можна пояснити спрощеністю використаної моделі та складністю залежності концентрації n_q від структурних недосконалостей графену [8].

Причиною можуть бути різні технології виготовлення графену: в технології досліджуваних нами сенсорів графен був перенесений з мідної фольги на сапфірову підкладку, а в роботі [3] використовувався метод епітаксійного осадження на підкладку карбиду кремнію. Використання сапфірової підкладки в нашій роботі було викликано наміром подальшого використання графенових сенсорів у радіаційних умовах.

4. Висновки

Проведена теоретична оцінка межі чутливості графенових сенсорів, яка показала, що при підвищених температурах максимальна

чутливість Холлівських сенсорів зменшується як $1/T^2$ через збільшення концентрації власних носіїв. Однак показано, що в температурному діапазоні до 400 К чутливість таких сенсорів залишається практично сталою і лише дуже слабо знижується з температурою

Виготовлені макетні зразки холлівських сенсорів з чутливих елементів одношарового графену та отримані їх основні параметри при струмі 100 мкА через сенсор: стала Холла – $(8 \cdot 10^5 \div 3 \cdot 10^6) \text{ см}^3/\text{Кл}$, концентрація носіїв заряду – $(2 \cdot 10^{12} \div 8 \cdot 10^{12}) \text{ см}^{-2}$, струмова чутливість до магнітного поля – $(100 \div 300) \text{ В} \cdot \text{А}^{-1} \cdot \text{Тл}^{-1}$, поверхневий опір – $(1 \div 2,5) \text{ кОм/квдрат}$. Слід відзначити: отримані значення чутливості в області кімнатних температур $\sim 230 \text{ В} \cdot \text{А}^{-1} \cdot \text{Тл}^{-1}$ суттєво перевищують максимальну чутливість традиційних холлівських сенсорів на основі кремнію $\sim 100 \text{ В} \cdot \text{А}^{-1} \cdot \text{Тл}^{-1}$.

Проведене експериментальне дослідження температурної залежності макетних зразків в інтервалі температур від 303 К до 433 К підтвердило, що в інтервалі температур до 400 К чутливість сенсорів слабо залежить від температури, що відповідає одержаній теоретичній оцінці. Відчутне зменшення чутливості починається в області температури $> 400 \text{ К}$. Температура, з якої починається помітний спад чутливості, залежить від технології

створення сенсорів, а також від матеріалу підкладки та технології виготовлення омичних контактів метал – графен.

Ці характеристики сенсорів на основі одношарового графену дозволяють сподіватися на розширення їхнього динамічного діапазону вимірювання магнітних полів, суттєве покращення роздільної здатності і можливість детектування слабких магнітних полів. Одержані характеристики також дозволяють очікувати зниження споживаної потужності сенсорного пристрою, оскільки при значно менших керуючих струмах можна досягнути вимірювання магнітних полів без втрати роздільної здатності.

Технологічні підходи до виготовлення макетних зразків сенсорів було обрано з урахуванням можливості подальших досліджень графенових сенсорів у жорстких радіаційних умовах прискорювачів заряджених частинок та в реакторах керованого термоядерного синтезу.

Роботу було підтримано МОН України в рамках бюджетної теми ДБ/ГРАФ «Радіаційна стійкість графену – інноваційного матеріалу сенсорної електроніки».

Список використаної літератури

- [1]. Bingyan Chen, Le Huang, Xiaomeng Ma, Lijun Dong, Zhiyong Zhang, Lian-Mao Peng. Exploration of sensitivity limit for graphene magnetic sensors. *Carbon* **94**, P. 585–589 (2015).
- [2]. Zhenxing Wang, Mehrdad Shaygan, Martin Otto, Daniel Schall and Daniel Neumaier. Flexible Hall sensors based on graphene. *Nanoscale* **8**, P. 7683–7687 (2016).
- [3]. Tymoteusz Ciuk, Beata Stanczyk, Krystyna Przyborowska, Dariusz Czolak, Artur Dobrowolski, Jakub Jagiello, Wawrzyniec Kaszub, Michal Kozubal, Roman Kozlowski, and Pawel Kaminski. High-Temperature Hall Effect Sensor Based on Epitaxial Graphene on High-Purity Semiinsulating 4H-SiC. *IEEE Transactions on Electron Devices* **66**, P.3134–3138 (2019).
- [4]. Brian T. Schaefer, Lei Wang, Alexander Jarjour, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Paul L. McEuen, Katja C. Nowack. Magnetic field detection limits for ultraclean graphene Hall sensors. *Nature Communications* **11**, 4163 (2020).
- [5]. M. V. Strikha. Fyzyka hrafenu: stan i perspektyvy. *Sensorna elektronika i mikrosystemni tekhnolohii*. **1** (7), No 3, 5–13 (2010).
- [6]. Yu. A. Kruglyak, M. V. Strikha. Uzahalnena model Landauera-Datta-Lundstroma v zastosuvanni do transportnykh yavyshech u hrafeni. *Ukrainskyi fizychnyi zhurnal. Ohliady*. **10**, 3–32 (2015).
- [7]. <https://www.graphenea.com/blogs/graphene-news/graphene-magnetic-sensors>
- [8]. S. Das Sarma, S. Adam, E. H. Hwang, E. Rossi. Electronic transport in two-dimensional graphene, *Rev. Mod. Phys.*, **83**, n 2, 407 (2011).
- [9]. Fang, T., Konar, A., Xing, H. L. & Jena, D. Carrier statistics and quantum capacitance of graphene sheets and ribbons. *Appl. Phys. Lett.* **91**, 092109 (2007).
- [10]. Yan Yin, Zengguang Cheng, Li Wang, Kuijuan Jin & Wenzhong Wang. Graphene, a material for high temperature devices – intrinsic carrier density, carrier drift velocity and lattice energy. *Scientific Reports* **4**, Article number: 5758 (2014).
- [11]. Jan Dauber, Abhay A. Sagade, Martin Oellers, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi Daniel Neumaier, and Christoph Stampfer. Ultra-sensitive Hall sensors based on graphene encapsulated in hexagonal boron nitride. *Applied Physics Letters* **106**, 193501 (2015).
- [12]. Mosser V., Matringe N., Haddab Y. A spinning current circuit for Hall measurements down to the nanotesla range. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. **66**, № 4, 637–650 (2017).
- [13]. Walker, R. C. et al. Radiation effects on two-dimensional materials. *Phys. Status Solidi A* **213**, 3065–3077 (2016).
- [14]. Meyer, J. C. et al. Accurate measurement of electron beam induced displacement cross sections for single-layer graphene. *Phys. Rev. Lett.* **108** 196102 (2012).

[15]. Wu, X. Influence of Particle Beam Irradiation on the Structure and Properties of Graphene, Springer Singapore, Singapore (2018).

[16]. Wang, H. et al. “Design of high-power graphene beam window», The 5th International Particle Accelerator Conference (Proc. Int. Conf. Dresden, Germany, 2014), JACoW, Geneva, Switzerland (2014).

[17]. Codornui-Pujals, D., Bermudez-Martinez, A. An expression for estimating the number of atoms displaced during the irradiation of monolayer graphene with neutrons, E-print, arXiv:1210.4099v1, 2012.

[18]. Compagnina, G. et al. Ion irradiation and defect formation in single layer graphene, *Carbon* 47 3201–3207 (2009).

[19]. Kryworuk, C. N., “The effects of neutron and gamma irradiation on graphene», Thesis for the degree of Master of Science, the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, USA, 2013.

[20]. Sun, L. et al. Two-dimensional materials under electron irradiation. *MRS Bull.* 40 29–37 (2015).

Стаття надійшла до редакції 20.08.2021 р.

UDC 539.2

DOI: 10.18524/1815-7459.2021.3.241056

DEPENDENCE OF MAXIMAL SENSITIVITY OF THE MAGNETIC FIELD HALL SENSORS BASED ON GRAPHENE ON TEMPERATURE

I. Bolshakova, M. Strikha, Ya. Kost, F. Shurygin, Yu. Mykhashchuk, Z. Wang, D. Neumaier

1 – Lviv Polytechnic National University, Magnetic Sensor Laboratory, Lviv, Ukraine.

E-mail: inessa.bolshakova@gmail.com

2 – Taras Shevchenko Kyiv National University, Faculty of Radiophysics, Electronics and Computer Sciences, 4g Hlushkov Av, Kyiv, Ukraine;

3 – V.E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics, NAS of Ukraine,

41 Nauky Av, Kyiv, Ukraine. E-mail: maksym_strikha@hotmail.com

4 – Advanced Microelectronic Center Aachen (AMICA), Otto-Blumenthal-Str. 2552074 Aachen, Germany. E-mail: wang@amo.de

Summary

A theory of graphene-based magnetic field Hall sensors sensitivity dependence on temperature is summarized. The examination was carried, basing on the assumption that carriers concentration in the Hall sensor channel is determined by the two addends: by carriers concentration in graphene channel, caused by the gate doping, and the “residual» carriers concentration, which doesn’t depend on gate voltage and is determined both by thermal activation of electrons from the valence band into conduction one, and by purely quantum reasons. Within such an assumption the maximal sensor sensitivity is determined by the number of the “residual» carriers, which can’t be turned into zero due to proper choice of the gate voltage. The existence of low-temperature range with sensitivity, almost independent on temperature, is predicted; at higher temperatures, when thermally-induced carrier concentration in graphene prevails, the sensitivity decreases with temperature.

The experimental studies of the temperature dependence of magnetic sensitivity of Hall sensors on the CVD fabricated single layer graphene base were carried in temperature range from 300 °K to 430 °K. The values of sensitivity, obtained for room temperatures $\sim 230 \text{ V} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{T}^{-1}$ exceed essentially the maximum sensitivity of the traditional Hall sensors on silicon base $\sim 100 \text{ V} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{T}^{-1}$. These characteristics of sensors on single layer graphene base permit to expect the extension of their

dynamic measuring range of magnetic field, the essential improvement of their resolution and the detection of the weak fields. The characteristics obtained permit as well to expect the decrease of the consumed power of sensor device, because it would be possible to measure the magnetic fields without the losses in resolution at lower operational currents.

Keywords: Magnetic field sensor, Hall effect, sensitivity, graphene, temperature

УДК 539.2

DOI: 10.18524/1815-7459.2021.3.241056

ЗАЛЕЖНІСТЬ МАКСИМАЛЬНОЇ ЧУТЛИВОСТІ ХОЛЛІВСЬКИХ СЕНСОРІВ МАГНІТНИХ ПОЛІВ НА ОСНОВІ ГРАФЕНУ ВІД ТЕМПЕРАТУРИ

I. Болшакова¹, М. Стріха^{2,3}, Я. Кость¹, Ф. Шуригін¹, Ю. Мухащук¹, Z. Wang⁴, D. Neumaier⁴

1 – Національний університет «Львівська політехніка», Лабораторія магнітних сенсорів, вул. Котляревського 1, м. Львів, Україна e-mail: inessa.bolshakova@gmail.com

2 – Київський національний університет ім. Тараса Шевченка, факультет радіофізики, електроніки і комп'ютерних систем, пр. Глушкова, 4г, Київ, Україна;

3 – Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України, пр. Науки, 41, Київ, Україна. E-mail: maksym_strikha@hotmail.com

4 – Advanced Microelectronic Center Aachen (AMICA), Otto-Blumenthal-Str. 2552074 Aachen, Germany. E-mail: wang@amo.de

Реферат

Викладено теорію чутливості холлівських сенсорів магнітних полів на основі графену в залежності від температури. Розгляд виходить з припущення, що концентрація носіїв у графеновому каналі сенсора Холла визначається двома складовими – концентрацією носіїв у каналі, обумовленою «легуванням» напругою на затворі, і концентрацією так званих «залишкових» носіїв, яка не залежить від напруги на затворі і обумовлена як термічними перекидами з валентної зони в зону провідності, так і суто квантовими причинами. При такому припущенні, максимальна чутливість сенсора визначається кількістю «залишкових» носіїв, яку не можна «занулити» вибором оптимальної напруги на затворі. Прогнозовано наявність низькотемпературної ділянки з незалежною від температури чутливістю з подальшим її спадом зі зростанням температури тоді, коли температурно-індукована концентрація носіїв в графені починає переважати.

Проведені експериментальні дослідження температурної залежності магнітної чутливості за струмом сенсорів Холла на основі одержаного методом CVD одношарового графену в інтервалі температур від 300 °К до 430 °К. Отримані значення чутливості в області кімнатних температур $\sim 230 \text{ В} \cdot \text{А}^{-1} \cdot \text{Тл}^{-1}$ суттєво перевищують максимальну чутливість традиційних холлівських сенсорів на основі кремнію $\sim 100 \text{ В} \cdot \text{А}^{-1} \cdot \text{Тл}^{-1}$. Ці характеристики сенсорів на основі одношарового графену дозволяють сподіватися на розширення їхнього динамічного діапазону вимірювання магнітних полів, суттєве покращення роздільної здатності і можливість детектування слабких магнітних полів. Одержані характеристики також дозволяють очікувати зниження споживаної потужності сенсорного пристрою, оскільки при значно менших керуючих струмах можна досягнути вимірювання магнітних полів без втрати роздільної здатності.

Ключові слова: Сенсор магнітного поля, ефект Холла, чутливість, графен, температура