

- Хімічний склад та розподіл елементів, що утворюються на початкових етапах окиснення, практично однакові незалежно від часу та тривалості зростання оксиду. Це підтверджує важливе значення термодинамічної рівноваги в формуванні межі розділу з оксидом.

1. Thurmond C.D., Scwartz G. ., Kammlott G.W., and Scwartz B. // *J. Electrochem. Soc.* – 1970. – Vol. 127. – P. 1336. 2. Rhiger D.R., Kvaas R.E. // *J. Vac. Sci. Technol.* – 1983. – Vol. A1. – P. 1712. 3. Diehl R., Nolang B.I. // *J. Crystal Growth.* – 1984. – Vol. 66. – P. 91. 4. Горелик С.С., Расторгуев Л.Н., Скаков Ю.А. *Рентгенографический и электроннооптический анализ.* – М.: Металлургия. 1970. – 66 с. 5. Алещенко Ю.А., Берченко Н.Н., Винникова А.И. и др. // *Письма в ЖТФ.* – 1989. – Т. 15, вип. 3. – С. 17.

УДК 621.315.592

І.А. Большакова<sup>1</sup>, Р.Л. Голяка<sup>2</sup>, Т.А. Марусенкова<sup>2</sup>  
 Національний університет "Львівська політехніка",  
<sup>1</sup>кафедра напівпровідникової електроніки,  
<sup>2</sup>кафедра електронних приладів

## ПОЛЬОВА ХАРАКТЕРИСТИКА СЕНСОРІВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА РОЗЩЕПЛЕНИХ ХОЛЛІВСЬКИХ СТРУКТУРАХ

Ó Большакова І.А., Голяка Р.Л., Марусенкова Т.А., 2010

I. Bolshakova, R. Holyaka, T. Marusenkova

## FIELD CHARACTERISTIC OF MAGNETIC SENSORS ON THE SPLITTED HALL STRUCTURES

Ó Bolshakova I., Holyaka R., Marusenkova T., 2010

Наведено аналіз польової характеристики сенсорів магнітного поля на розщеплених холлівських структурах. Характеризуючись рядом принципних переваг, зокрема, можливістю інтегрування у трикомпонентні (BX, BY, BZ) зонди магнітного поля з високою просторовою роздільною здатністю, такі розщеплені холлівські структури вимагають глибшого аналізу залежності вихідної напруги сенсора від вектора індукції магнітного поля. Запропоновано модель розщепленої холлівської структури, що описує паразитну магніторезистивну модуляцію польової характеристики, методику дослідження цієї модуляції та її кількісні параметри. Наводиться приклад застосування отриманих результатів під час калібрування трикомпонентних вимірювальних зондів магнітного поля.

*Ключові слова:* сенсор, магнітне поле, холлівські структури.

The work gives an analysis of the field characteristics of magnetic sensors on the splitted Hall structures. Having a number of advantages (including the capability to be integrated into three-component magnetic probes with high spatial resolution), such splitted Hall structures require further analysis of output voltage dependence on magnetic induction vector. Besides, this paper proposes a splitted Hall structure model describing the parasitic magnetoresistive modulation of the field characteristic, the methodology of this modulation study and its

**numerical parameters. It is shown how to apply the obtained results when calibrating three-component magnetic probes.**

**Keywords: sensor, magnetik field, Hall structures.**

### Вступ

Гальваномагнітні сенсори є одним з найпоширеніших засобів вимірювання магнітного поля. Їх характеризує здатність вимірювання в широкому діапазоні магнітного поля (від одиниць мікроТесла і до десятків Тесла) та температури (від одиниць градусів Кельвіна і до 400 К), мініатюрні розміри (декілька міліметрів), висока технологічність та мінімальна собівартість у масовому виробництві.

Значна зацікавленість останнім часом проявляється до сенсорів на розщеплених холлівських структурах (РХС). На відміну від традиційних елементів Холла з симетричною структурою, такі РХС передбачають розвиненішу топологію на базі декількох напівелементів Холла. Використовуючи такі напівелементи Холла, формують тривимірні 3-D зонди, що дозволяють вимірювати три ортогональні проекції  $V_x, V_y, V_z$  вектора  $\vec{B}$  індукції магнітного поля в одній точці простору [1–3].

Один з найефективніших варіантів реалізації 3-D зондів магнітного поля ґрунтується на кутових РХС, топологія яких спроектована так, щоб чутлива зона сенсора перебувала в кутовій частині підкладки [4–7]. На рис. 1 наведена топологія сенсора на кутовій РХС та 3-D зонд вимірювання вектора індукції магнітного поля основі трьох ортогонально розвернутих РХС. В ідеальному варіанті площини РХС є строго перпендикулярні відповідним проекціям  $V_x, V_y, V_z$  вектора  $\vec{B}$  індукції магнітного поля. Однак, внаслідок недосконалості технології позиціонування кожна РХС реальних 3-D зондів характеризується певними кутами несоосності, що описують кути нахилу нормалей РХС до проекцій  $V_x, V_y, V_z$ .

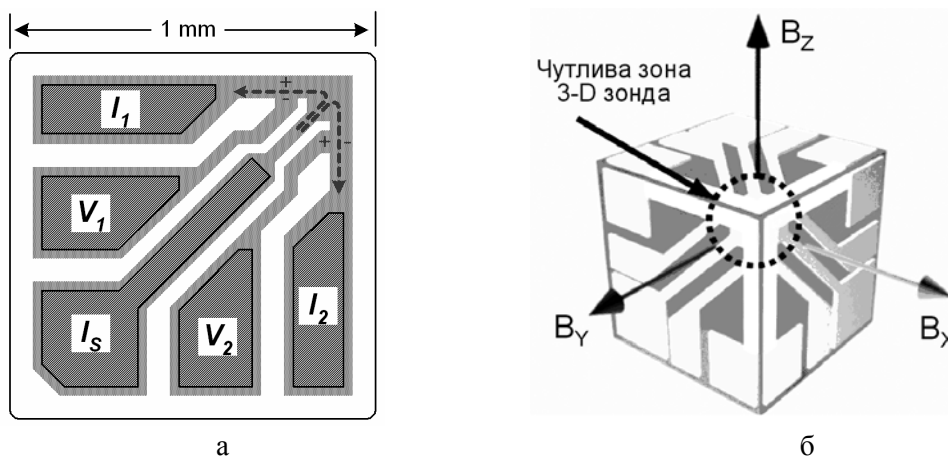


Рис. 1. Топологія сенсора на кутовій РХС (а) та 3-D зонд на його основі (б)

Кутова РХС містить два холлівські напівелементи  $HHS_1, HHS_2$  (Half Hall Sensor), об'єднані одним струмовим виводом  $I_s$ . Робочий струм сенсора рівномірно розподіляється між цим виводом та іншими двома струмовими виводами  $I_1, I_2$ . Вихідна напруга сенсора формується на потенціальних виводах  $V_1, V_2$ , які сформовані на однаковій відстані від струмових виводів. Це забезпечує рівність синфазної напруги на потенціальних виводах, натомість, напруга Холла на потенціальних виводах має протилежний знак. Вивід напруг  $V_1, V_2$  проводиться через ділянки активного шару, що максимально наближені до кутової ділянки сенсора.

Таке топологічне рішення кутової РХС дає змогу сформувати 3-D зонд з високою просторовою роздільною здатністю, адже всі чутливі ділянки трьох ортогонально розвернутих сенсорів зосереджені в безпосередній близькості одна до одної (рис. 2).

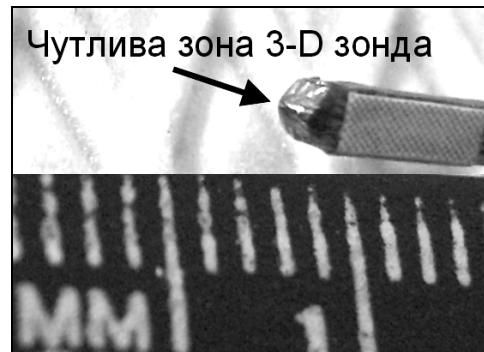


Рис. 2. Фотографія 3-D зонда на РХС

Перевагами такого 3-D зонда є:

- по-перше, чутливі області кутових РХС розміщені на вершині куба, забезпечуючи високу просторову роздільну здатність (у дослідному зразку всі чутливі ділянки зосереджені в просторі діаметром 0,2 мм, що на порядок краще ніж в 3-D зондах магнітного поля на традиційних елементах Холла) та можливість безпосереднього контакту цієї вершини з досліджуваною поверхнею;
- по-друге, на протигагу від відомих 3-D зондів, які за фізичним принципом роботи передбачають використання товстих активних шарів, кутові сенсорні виготовляються на активних шарах з мінімальною товщиною ( $\approx 1$  мкм), і це забезпечує їхню високу магнітну чутливість (типово, 100–300 мВ/Т) та незначну паразитну перехресну чутливість ( $< 1\%$ );
- і, по-третє, для реалізації РХС використовуються традиційні тонкоплівкові мезотехнології, зокрема, на основі високотемпературних та радіаційно-стійких напівпровідників груп  $A^{III}B^V$ ,  $A^{II}B^{VI}$ , що забезпечує можливість створення вимірювальних 3-D зондів магнітного поля для екстремальних умов експлуатації в прискорювачах заряджених частинок, циклотронах, реакторах термоядерного синтезу тощо.

Важливою є також можливість реалізації таких 3-D зондів за масовою технологією традиційних тонкоплівкових сенсорів Холла, що забезпечує мінімальні затрати на освоєння їх виробництва.

Все ж, використання РХС в 3-D зондах має певну проблематику. Зокрема, як було визначено в численних експериментах, польова характеристика таких сенсорів має складнішу функціональну залежність, що особливо проявляється при значних магнітних полях і вимагає розроблення нових підходів у калібруванні 3-D зондів.

### Аналіз проблеми

Традиційно для опису залежності польової характеристики елементів Холла при стабільному струмі живлення використовують лінійне рівняння  $V_{OUT} = V_0 + K_B B_N$ , де  $V_{OUT}$  – вихідна напруга;  $V_0$  – напруга нееквіпотенційності (offset);  $K_B$  – лінійний коефіцієнт вольтової чутливості;  $B_N$  – проекція вектора  $\vec{B}$  індукції магнітного поля на нормаль  $N$  до площини чутливого елемента. Іншими двома проекціями вектора  $\vec{B}$ , що лежать в площині чутливого елемента, а саме, паралельною  $B_L$  та перпендикулярною  $B_W$  до струму живлення елементів Холла проекціями традиційно нехтують [1, 2].

Для точнішого описування використовують поліноми. Зокрема, поліном другого порядку  $V_{OUT} = V_0 + K_{B1} B_N + K_{B2} B_N^2$ , де  $K_{B1}$ ,  $K_{B2}$  – відповідно, лінійний та квадратичний коефіцієнти,

дозволяє описати польову характеристику з похибкою не гірше 0,1%. Отже, процес калібрування елемента Холла в 3-D зонді передбачає знаходження трьох вищезгаданих величин  $V_0, K_{B1}, K_{B2}$  та двох кутів  $\alpha_Z, \beta_Z$  (нахилу площини сенсора та його повороту відносно базової системи координат), що визначають проекцію  $B_N$  вектора індукції  $\vec{B}$  магнітного поля на нормаль до площини чутливого елемента. Крім того, визначають температурні коефіцієнти польової характеристики, однак, враховуючи, що визначення цих коефіцієнтів для РХС нічим не відрізняється від традиційних елементів Холла, аналіз температурних характеристик в подальшому матеріалі статті не наводиться.

Вказана польова характеристика була використана під час калібрування наведеного на рис. 2 3-D зонда на основі трьох ортогонально розвернутих РХС. Проведене калібрування дало хороші результати, зокрема, в магнітному полі до 300 мТ, похибка вимірювання трьох складових  $V_x, V_y, V_z$  вектора індукції магнітного поля  $\vec{B}$  не перевищувала 0,3 %. Аналіз отриманих коефіцієнтів польової характеристики показав, що до 0,2 % похибка визначалася неточністю встановлення кутів кристалів сенсорів у 3-D зонді, натомість похибка апроксимації поліномом другого порядку не перевищувала 0,1 %.

Однак спроба застосувати вищевказану польову характеристику під час калібрування 3-D зонда на основі РХС у більших магнітних полях дала негативні результати – похибка визначення магнітного поля в діапазоні 1 Т сягала декількох процентів.

Здійснений аналіз показав, що для адекватного описування польової характеристики кутових РХС необхідно ввести нові коефіцієнти, що описують залежності вихідної напруги таких сенсорів від вектора індукції магнітного поля  $\vec{B}$ . Як буде показано нижче, у результаті аналізу стало можливим розробити нову методику дослідження польової характеристики РХС та розрахунку її коефіцієнтів, що забезпечило істотне підвищення точності вимірювання вектора індукції магнітного поля.

### Аналіз польової характеристики кутової РХС

Представимо кутову РХС у вигляді еквівалентної схеми (рис. 3), резистори  $R_{11}, R_{12}, R_{13}, R_{21}, R_{22}, R_{23}, R_S$  якої описують відповідні частини напівпровідникового шару, а джерела напруги  $E_{1H}, E_{2H}$  – холлівські потенціали напівелементів  $NHS_1, NHS_2$ . Струм живлення РХС протікає по колах  $\boxed{I_S} \rightarrow \boxed{I_1}$  та  $\boxed{I_S} \rightarrow \boxed{I_2}$ . Виводи  $\boxed{I_1}$  та  $\boxed{I_2}$  поєднують, що, враховуючи симетрію структури в першому наближенні ( $R_{11} = R_{21}, R_{12} = R_{22}, R_{13} = R_{23}$ ), забезпечує взаємну рівність струмів  $I_1 = I_2$  в обох напівелементах та рівність синфазної вихідної напруги сенсора. Натомість, джерела холлівської напруги мають протилежну полярність. Це обумовлено тим, що в напівелементі  $NHS_1$  потенціальний вивід під'єднано з лівого боку, а в напівелементі  $NHS_2$  – з правого боку струмового кола. Отже, в першому наближенні можна вважати, що різниця вихідна напруга сенсора  $V_{OUT} = V_2 - V_1$  визначається лише сумою абсолютних напруг джерел  $E_{1H}, E_{2H}$ :  $V_{OUT} = V(E_{1H}) + V(E_{2H})$ .

Однак детальніший аналіз еквівалентної схеми показує, що за відсутності симетрії напівелементів  $NHS_1, NHS_2$  вихідна напруга сенсора стає залежною від зміни опорів резисторів та перерозподілу струмів  $I_1, I_2$ . Причинами асиметрії є, по-перше, неідеальність геометрії тонкоплівкової структури внаслідок дефектів процесів фотолітографічного формування (травлення) мезаструктури, і, по-друге, обумовлений магніторезистивним ефектом вплив магнітного поля на електричний опір резисторів. При цьому можна вважати, що впливом опорів  $R_{13}$  та  $R_{23}$  вихідного кола можна знехтувати – при високоомному навантаженні, зокрема на вхід диференційного підсилювача, струм через це коло практично є нульовим. Вплив зміни опору  $R_S$  на вихідну напругу також є неістотним, адже має місце лише симетрична зміна синфазних напруг.

Знехтувати можна також пропорційною зміною опорів напівелементів, при якій зберігаються сталими співвідношення  $R_{11} / R_{12}$  та  $R_{21} / R_{22}$ . Попри це, при нестабільності вищезгаданих

співвідношень опорів виникає паразитна різниця напруг  $V(R_{21}) - V(R_{11}) = V(\Delta R_B)$ , що обумовлює складніший характер польової характеристики РХС та магніторезистивну модуляцію різницевої вихідної напруги  $V_{OUT} = V(E_{1H}) + V(E_{2H}) + V(\Delta R_B)$ .

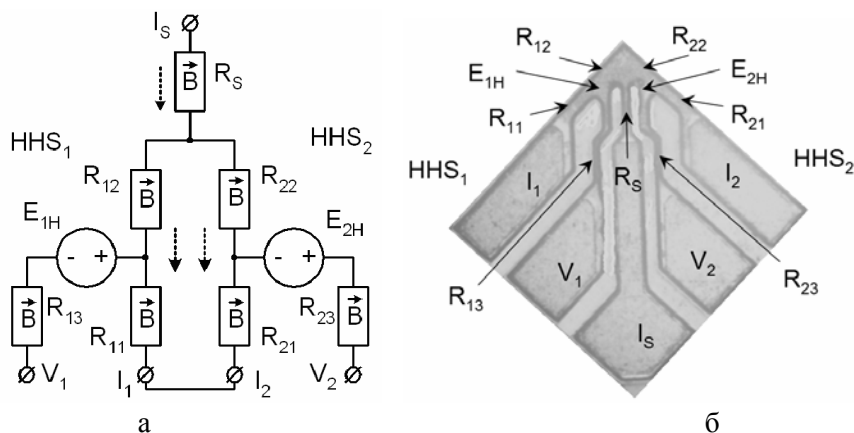


Рис. 3. Еквівалентна схема РХС (а) та фотографія РХС з позначеннями елементів моделі (б)

У результаті проведеного аналізу були виявлені основні фактори магніторезистивної модуляції польової характеристики РХС. Перший з них обумовлений різницею впливу вектора індукції магнітного поля на опори напівелементів  $HNS_1$ ,  $HNS_2$ , адже їх струмові кола розміщені під різними кутами до вектора індукції. Другий фактор обумовлений складним характером розтікання струму в кутовій ділянці РХС, яка в моделі представлена резисторами  $R_{11}$  та  $R_{21}$ . Оскільки напрям струмових ліній в цій ділянці не є сталим, різним буде і результат магніторезистивного ефекту. Третій фактор, як це вже вище відзначалося, обумовлений відсутністю ідеальної симетрії напівелементів РХС, однак, на відміну від традиційних елементів Холла, асиметрія зумовлює не лише напругу нееквіпотенційності, але і призводить до її модуляції паралельними до площини сенсора проекціями вектора індукції магнітного поля.

Відзначимо, що відділяти вплив кожного окремо взятого фактора практично неможливо, а з погляду калібрування сенсора – недоцільно. Тому введемо інтегральний показник  $\Delta R(B)$  магніторезистивної модуляції польової характеристики РХС. Враховуючи типово квадратичну залежність опору напівпровідникових шарів від модуля вектора індукції  $\vec{B}$  та його проєкцій  $V_N$ ,  $V_L$ ,  $V_W$  на лінії електричного струму, магніторезистивну модуляцію доцільно описати поліномом другого степеня, окремо виділивши вплив кожної з проєкцій:

$$\Delta R_B = R_{B0} \left( K_{N1} V_N + K_{N2} V_N^2 + K_{L1} V_L + K_{L2} V_L^2 + K_{W1} V_W + K_{W2} V_W^2 \right),$$

де  $R_{B0}$  – розмірний коефіцієнт;  $K_{N1}$ ,  $K_{L1}$ ,  $K_{W1}$  – відповідно, лінійні, а  $K_{N2}$ ,  $K_{L2}$ ,  $K_{W2}$  – квадратичні коефіцієнти магніторезистивної модуляції.

З метою визначення характеру впливу проєкцій  $V_N$ ,  $V_L$ ,  $V_W$  вектора індукції на опір структури були проведені експерименти, під час яких вимірювали відносну зміну опору  $R(B) / R_0$  активного шару тонкоплівкової структури сенсора. Досліджувався традиційний елемент Холла з симетричною структурою [1, 2], в якому струм живлення протікає строго в певному напрямку. Це дозволило незалежно визначити вплив проєкцій  $V_N$ ,  $V_L$ ,  $V_W$  на відносну зміну опору активного шару. Результати таких досліджень наведені на рис. 4, зокрема:

- характеристика  $R(V_L)$  відповідає зміні опору структури при напрямку вектора індукції поля, що є паралельним до лінії струму;
- характеристика  $R(V_W)$  відповідає зміні опору при векторі індукції, що є перпендикулярним до лінії струму, однак, паралельним до чутливого шару структури;
- характеристика  $R(V_N)$  відповідає зміні опору при векторі індукції, що є перпендикулярним до поверхні структури, а отже, і до лінії струму (паралельним нормалі до поверхні).

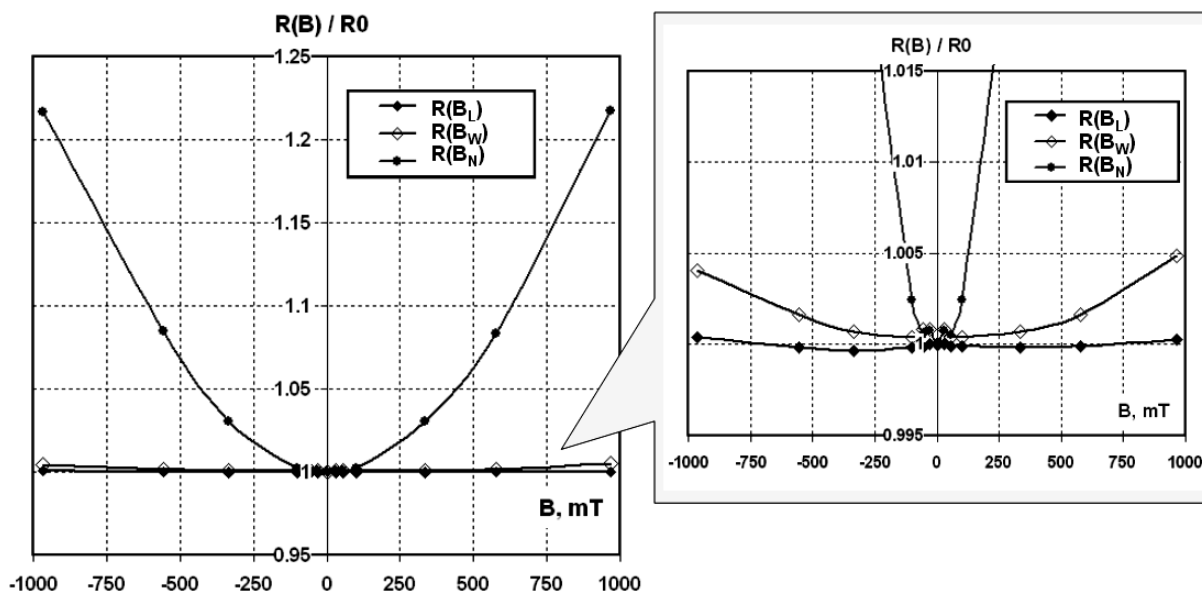


Рис. 4. Результати дослідження магніторезистивного ефекту в структурі сенсора

Найбільший вплив на зміну опору (понад 20 %/Т) спостерігається при перпендикулярному до поверхні структури сенсора напрямку  $B_N$  вектора індукції. Це є очевидним, оскільки ширина активного шару сенсора істотно перевищує його товщину (типово товщина активного шару має порядок 1 мкм), а отже, відхилення траєкторії руху носіїв внаслідок сили Лоренца є значним. Тим не менш, впливом перпендикулярного до поверхні структури сенсора  $B_N$  вектора індукції на досліджуваній ефект магніторезистивної модуляції вихідної напруги РХС можна знехтувати. Адже, в обох напівелементах  $NHS_1$ ,  $NHS_2$  результат магніторезистивної модуляції є ідентичним і, не призводячи до зміни співвідношень  $R_{11}/R_{12}$ ,  $R_{21}/R_{22}$ , не впливає на різницеву вихідну напругу  $V_{OUT}$ .

Результати проведених досліджень свідчать також, практично, про відсутність зміни опору  $R(B_L)$  при векторі індукції, що є паралельним до лінії струму. Отже, аналіз модуляції польової характеристики РХС повинен проводитися лише для поля, що є перпендикулярним до лінії струму та паралельним до чутливого шару структури. Отримана залежність  $R(B_W)$  свідчить про можливість знехтувати лінійним коефіцієнтом магніторезистивної модуляції. Натомість, враховуючи, що більшість дефектів фотолітографічного формування РХС є неповторювані, квадратичний коефіцієнт магніторезистивної модуляції повинен визначатися для кожного сенсора окремо.

#### Методика дослідження магніторезистивної модуляції

Для дослідження магніторезистивної модуляції польової характеристики РХС була розроблена методика, що ґрунтується на вимірюванні залежності вихідної напруги сенсора  $V_{OUT}(\varphi)$  під час його обертання в магнітному полі, вектор індукції якого є паралельним до площини структури сенсора, а вісь обертання збігається з нормаллю до цієї площини. Виміряти кількісні параметри магніторезистивної модуляції можна лише в доволі сильних магнітних полях. Пояснюється це тим, що, як це слідує з рис. 4, магніторезистивний ефект в полі до 300 мТ проявляється незначно.

На першому етапі дослідження від отриманого сигналу сенсора необхідно відняти залишкове значення вихідної напруги сенсора  $V_0$ , яке вимірюється у разі розміщення сенсора в магнітному екрані:  $V_S(\varphi) = V_{OUT}(\varphi) - V_0$ . На другому етапі проводять процедуру відокремлення напруги магніторезистивної модуляції від холлівської напруги сенсора. Необхідність цього пояснюється неідеальністю збігу осі обертання з нормаллю, що типово має місце при масовому калібруванні вже готових 3-D зондів. Проводять таку процедуру, підбираючи першу гармоніку коливання (амплітуду та фазу), що описує зміну холлівської напруги  $V_1(\varphi)$  при циклічному обертанні ідеального сенсора без

магніторезистивної модуляції. Для спрощення процедури на цьому етапі дослідження польова характеристика ідеального сенсора може бути прийнята лінійною функцією магнітного поля. Це припущення дає змогу записати гармонічне коливання у вигляді:

$$V_1(\varphi) = V_{HM} \sin(\alpha) \sin(\varphi + \beta),$$

де  $V_{HM} = S_{HN} \cdot B_N$  – максимальне значення холлівської напруги у разі збігу вектора індукції з нормаллю до площини сенсора;  $S_{HN}$  – магнітна чутливість сенсора до нормальної складової  $B_N$  вектора індукції поля при номінальному струмі живлення  $I_{NOM}$ ;  $\alpha$  – кут між віссю обертання та нормаллю;  $\beta$  – кут початкового розсуміщення системи координат структури сенсора з системою координат магнітного поля.

В ідеальному випадку за відсутності першої гармоніки кут  $\alpha \rightarrow 0$ , а кут  $\beta$  визначає положення обертового механізму в першій точці вимірювання функції  $V_{OUT}(\varphi)$ . Критерієм вдалого підбору параметрів першої гармоніки  $V_1(\varphi)$  є сигнал  $V_2(\varphi) = V_{OUT}(\varphi) - V_0 - V_1(\varphi)$ , що описується переважно другою гармонікою коливання. Адже, внаслідок квадратичної залежності опору структури від індукції, саме друга гармоніка визначає досліджувану магніторезистивну модуляцію польової характеристики.

На третьому етапі дослідження визначають кількісні параметри магніторезистивної модуляції. Достатню точність апроксимації отримують за виразом  $V_{RB} = S_{RB} \cdot B_W^2$ , де  $V_{RB}$  – паразитна різницева напруга, що виникає на потенційних виводах РХС за наявності паралельної до площини структури сенсора складової  $B_W$ , а  $S_{RB}$  – коефіцієнт магніторезистивної модуляції. Напруга  $V_{RB}$  є адитивною, тобто, додається до вихідної напруги ідеального сенсора без врахування вказаної модуляції.

Приклад типової залежності вихідної напруги  $V_{OUT}(\varphi)$  РХС під час її обертання в однорідному магнітному полі з індукцією  $B \approx 1$  Т, а також розклад отриманого сигналу  $V_S(\varphi)$  на першу  $V_1(\varphi)$  та другу  $V_2(\varphi)$  гармоніки, наведено на рис. 5. Досліджувався сенсор на РХС з магнітною чутливістю  $S_{HN} = 235$  мВ/Т (при  $I_{NOM} = 20$  мА). Отримане амплітудне значення першої гармоніки  $V_{1M} \approx 2,5$  мВ при вказаній чутливості сенсора свідчить, що кут між віссю обертання та нормаллю до площини структури є незначним і приблизно становить

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{V_{1M}}{B \cdot S}\right) \approx 1^\circ.$$

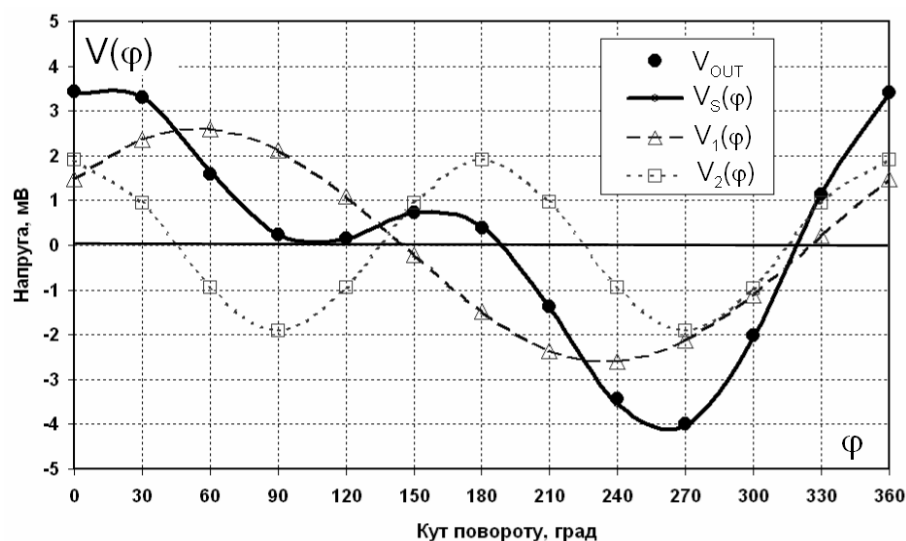


Рис. 5. Магніторезистивна модуляція польової характеристики<sup>Λ</sup>

$V_{OUT}$  – експериментальні результати;  $V_S(j)$  – апроксимація результатів першою  $V_1(j)$  та другою  $V_2(j)$  гармоніками

Коефіцієнт магніторезистивної модуляції  $S_{RB}$  польової характеристики РХС розраховують, визначивши амплітудне значення другої гармоніки, що в наведеному прикладі становить  $V_{2M} \approx 1,9$  мВ. Тоді,  $S_{RB} = V_{2M}/B_{X1}^2 \approx 1,9$  мВ/Т<sup>2</sup>. Відзначимо, що як і коефіцієнт магнітної чутливості  $S_{HN}$ , коефіцієнт магніторезистивної модуляції є лінійною функцією струму живлення сенсора, тобто, визначається і враховується при фіксованому (номінальному) струмі  $I_{NOM}$ .

### Апробація

Наведена в роботі методика аналізу польової характеристики РХС була апробована під час калібрування 3-D зонда (рис. 2), причому польова характеристика сенсора, отримана в результаті використання запропонованих кількісних параметрів магніторезистивної модуляції, порівнювалася з традиційною характеристикою без врахування цього ефекту.

На відміну від традиційних поліномів, що описують залежність вихідної напруги елементів Холла лише від проекції вектора магнітного поля на нормаль  $N$  до площини структури сенсора, запропоновані рівняння польової характеристики РХС містять коефіцієнти магніторезистивної модуляції, що визначають залежність вихідної напруги від  $B_W$  проекції вектора магнітного поля. Відповідно до цього, польові характеристики сенсорів РХС трикомпонентного зонда (рис. 1, б) можна подати рівняннями:

$$\begin{aligned} V_{OUT1} &= V_{01} + K_{B11} B_{N1} + K_{B21} B_{N1}^2 + K_{B31} B_{W1}^2, \\ V_{OUT2} &= V_{02} + K_{B12} B_{N2} + K_{B22} B_{N2}^2 + K_{B32} B_{W2}^2, \\ V_{OUT3} &= V_{03} + K_{B13} B_{N3} + K_{B23} B_{N3}^2 + K_{B33} B_{W3}^2, \end{aligned}$$

де  $V_{OUT1}$ ,  $V_{OUT2}$ ,  $V_{OUT3}$  – вихідні напруги трьох РХС трикомпонентного зонда;  $V_{01}$ ,  $V_{02}$ ,  $V_{03}$  – значення вихідних напруг цих РХС при  $B = 0$ ;  $K_{B11}$ ,  $K_{B12}$ ,  $K_{B13}$  – лінійні коефіцієнти, а  $K_{B21}$ ,  $K_{B22}$ ,  $K_{B23}$  – квадратичні коефіцієнти залежності вихідних напруг від проекцій поля  $B_{N1}$ ,  $B_{N2}$ ,  $B_{N3}$ ;  $K_{B31}$ ,  $K_{B32}$ ,  $K_{B33}$  – квадратичні коефіцієнти магніторезистивної модуляції, що визначають залежності вихідних напруг від проекцій поля  $B_{W1}$ ,  $B_{W2}$ ,  $B_{W3}$ , відповідно.

Використовуючи вказані польові характеристики, а також матриці, що зв'язують базову систему координат 3-D зонда з локальними системами координат сенсорів та кутами їх нахилу відносно базової системи, розраховують проекції вектора індукції магнітного поля та його модуль

$$B = \sqrt{B_X^2 + B_Y^2 + B_Z^2}.$$

Для перевірки ефективності запропонованої методики були проведені експерименти порівняльного аналізу результатів вимірювання модуля вектора індукції магнітного поля при довільних поворотах 3-D зонда в однорідному магнітному полі. Очевидно, що у разі ідеального калібрування виміряні значення модуля вектора індукції однорідного магнітного поля не повинні залежати від кутів нахилу 3-D зонда, тобто, нестабільність результуючого сигналу повинна прямувати до нуля.

Приклад результатів проведених експериментів в полі  $B = 1$  Т наведено на рис. 6. Можна бачити, що якість калібрування польової характеристики 3-D зонда на РХС без врахування магніторезистивної модуляції (Calibration 1) не є достатньо високою – нестабільність результатів розрахунку поля при довільних поворотах 3-D зонда становить  $\pm 2$  %. Причому, калібрування окремо взятих сенсорів до нормальної  $B_Z$  складової поля проводилося з типовою похибкою порядку  $\pm 0.1$ %. Крім того, вищезазначена нестабільність проявлялася лише при сильних магнітних полях. Натомість, в полі 0,1 Т нестабільність не перевищувала  $\pm 0.2$  %, що свідчило про високу точність визначення кутів нахилу сенсорів в 3-D зонді.

Результат вимірювання з урахуванням запропонованої методики аналізу магніторезистивної модуляції та коефіцієнтів, що описують цю модуляцію, подано графіком Calibration 2. Можна бачити, що нестабільність результатів розрахунку модуля вектора індукції магнітного поля зменшилася до  $\pm 0.3$  %, тобто, майже на порядок.



Запропонована методика спрямована на підвищення точності засобів картографування магнітних полів систем відхилення пучків у прискорювачах заряджених частинок.

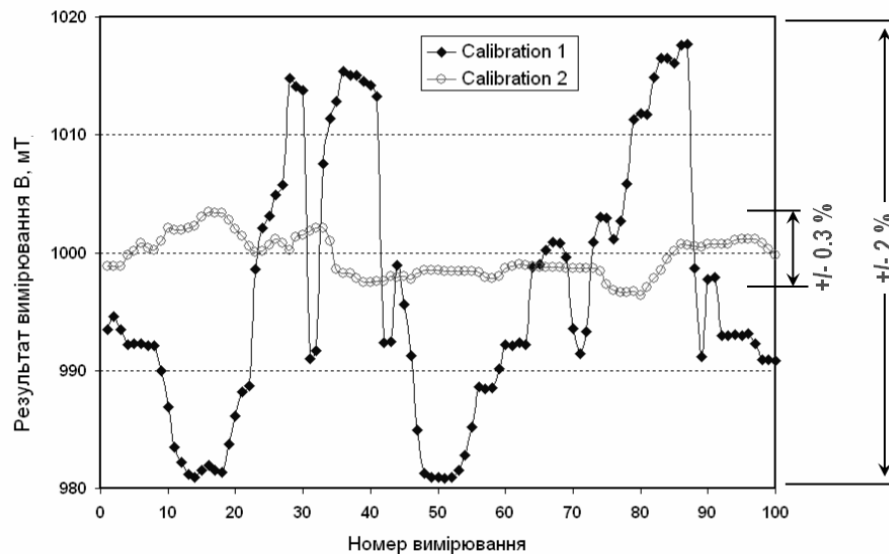


Рис. 6. Результати вимірювання модуля вектора індукції магнітного поля при довольних поворотах 3-D зонда в однорідному магнітному полі без врахування (Calibration 1) та з врахуванням (Calibration 2) ефекту магніторезистивної модуляції

### Висновки

Показано, що польова характеристика сенсорів магнітного поля на РХС характеризується паразитною магніторезистивною модуляцією. Визначено основні фактори магніторезистивної модуляції польової характеристики РХС, розроблено методику її аналізу та експериментального визначення кількісних параметрів цієї модуляції.

На відміну від традиційних поліномів, що описують залежність вихідної напруги елементів Холла лише від проекції вектора магнітного поля на нормаль  $N$  до площини структури сенсора, запропоновані в роботі рівняння польової характеристики РХС містять коефіцієнти магніторезистивної модуляції, які визначають залежність вихідної напруги від проекцій вектора магнітного поля, що лежить в площині структури сенсора.

Експериментально підтверджено, що у разі використання квадратичного коефіцієнта залежності вихідної напруги сенсора від паралельної до площини структури проекції вектора індукції магнітного поля похибка калібрування 3-D зонда на РХС в полі  $\pm 1$  Т зменшується з 2 % до  $\pm 0.3$  %.

1. Popovic R.S. *Hall Effect Devices. Second edition.* Adam Hilger, Bristol, Philadelphia and New York, 2002.
2. Мікроелектронні сенсорні пристрої магнітного поля / За ред. З.Ю. Готри; І.А. Большакова, М.Р. Гладун, Р.Л. Голяка, З.Ю. Готра, І.Є. Лопатинський, Є. Потенці, Л.І. Сопільник -Львів: Вид-во Нац. ун-ту "Львівська політехніка", 2001.
3. Burger F., Besse P.-A., Popovic R.S. *New fully integrated 3-D silicon Hall sensor for precise angular-position measurements. Sensors and Actuators.* A 67. – 1998. – P. 72–76.
4. Пат. № 72832 Україна, МКИ 7 G 01 R 33/06, H 01 L 43/06. *Вимірювальний перетворювач магнітного поля* / Большакова І.А., Голяка Р.Л. (Україна) – № 2003065533; Заявл. 13.06.03; Опубл. 15.04.05, Бюл. № 4.
5. Пат. № 73816 Україна, МКИ 7 G 01 R 33/06. *Вимірювальний перетворювач магнітного поля* / Большакова І.А., Голяка Р.Л. (Україна) – № 2003065532; Заявлено 13.06.03; Опубл. 15.09.05, Бюл. № 9.
6. Большакова І.А., Голяка Р.Л., Макідо О.Ю., Марусенкова Т.А. *Нові конструкції напівпровідникових тонкоплівкових 3-D сенсорів магнітного поля* // *Електроніка и связь.* – 2009. – № 2–3. – С. 6–10.
7. Большакова І.А., Голяка Р.Л.,

Мороз А.П., Єрашок В.Е., Марусенкова Т.А. Сенсорні пристрої магнітного поля на сенсорах Холла з розщепленою структурою // Вісн. Нац. ун-ту "Львівська політехніка". – 2009. – № 646: Електроніка. – С. 38–46.

УДК 621.315.592

І.А. Большакова, Д.М. Заячук, Я.Я. Кость, О.Ю. Макідо, Ф.М. Шуригін  
Національний університет "Львівська політехніка",  
кафедра напівпровідникової електроніки

## ТЕХНОЛОГІЯ ОТРИМАННЯ ВІСКЕРІВ GaAs У ВІДКРИТОМУ ПРОТОЧНОМУ РЕАКТОРІ

© Большакова І.А., Заячук Д.М., Кость Я.Я., Макідо О.Ю., Шуригін Ф.М., 2010

I.A. Bolshakova, D.M. Zayachuk, Ya.Ya. Kost, O.Yu. Makido, F.M. Shurygin

## TECNOLOGY OF OBTAINING GaAs WHISKERS IN OPEN FLOW REACTOR

© Bolshakova I.A., Zayachuk D.M., Kost Ya.Ya., Makido O.Yu., Shurygin F.M., 2010

Наведена технологія отримання мікрівіскерів GaAs в проточному реакторі. Технологія дає змогу контролювати діаметри віскерів у діапазоні від десятків нанометрів до десятків мікрон. Запропонована модель, яка пояснює основні етапи осадження матеріалу з парової фази. Основними положеннями моделі є механізм пара-рідина-кристал і конкуруючий ріст нанодротин.

*Ключові слова:* арсенід галію, нановіскер (нанодротина), віскер, механізм ПРК, парогазова фаза, проточний реактор, дозрівання Освальда.

The technology for obtaining GaAs microwhiskers in flow reactor is presented. The technology allows controlling whiskers diameters in the range from tens of nanometers to tens of microns. The model explaining the basic stages of material deposition from vapour phase is suggested. The basic principles of the model are the vapour-liquid-solid mechanism and competitive nanowires growth.

*Keywords:* gallium arsenide, nanowhisker (nanowire), whisker, VLS mechanism, gas-vapor phase, flow reactor, Ostwald ripening.

### Вступ

Мікрівіскери – монокристали, поперечні розміри яких на кілька порядків менші за їх довжину, є практично бездефектними кристалами, їх дослідження виявляє граничні можливості матеріалу. Значний інтерес становлять віскери такого матеріалу, як GaAs, оскільки за своєю геометрією вони ідеально підходять для монтування в блоки оптоелектронних систем [1]. Разом з тим технології відтворюваного отримання мікрівіскерів практично відсутні.

Основою відтворюваної технології осадження нановіскерів з парової фази є механізм пара-рідина-кристал (ПРК) [2], який ґрунтується на утворенні евтектики сплаву золото-напівпровідниковий матеріал. Діаметри нанодротин визначаються діаметром наночастинок золота, які попередньо наносять на підкладку шляхом використання колоїдних розчинів «наносфер» золота [3], або