

ФІЗИКА, ТЕХНОЛОГІЯ ТА ВИРОБНИЦТВО ЕЛЕМЕНТІВ, ПРИЛАДІВ ТА СИСТЕМ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ

УДК 621.315.592

І.А. Большакова¹, Р.Л. Голяка², З.Ю. Готра², Т.А. Марусенкова²
Національний університет "Львівська політехніка"
¹кафедра напівпровідникової електроніки,
²кафедра електронних приладів,

ПАРАМЕТРИ ТА МОДЕЛІ ДВОКООРДИНАТНОГО СКАНЕРА МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ОСНОВІ РОЗЩЕПЛЕНИХ ХОЛЛІВСЬКИХ СТРУКТУР

Ó Большакова І.А., Голяка Р.Л., Готра З.Ю., Марусенкова Т.А., 2011

I. Bolshakova, R. Holyaka, Z. Hotra, T. Marusenkova

PARAMETERS AND MODELS OF TWO-COORDINATE MAGNETIC FIELD SCANNER ON THE SPLITTED HALL STRUCTURES

Ó Bolshakova I., Holyaka R., Hotra Z., Marusenkova T., 2011

Наведено аналіз характеристик сканерів магнітного поля на основі лінійок розщеплених холлівських структур. На відміну від традиційних лінійних сканерів магнітного поля, конструкція лінійок розщеплених холлівських структур дає змогу істотно підвищити роздільну здатність двокоординатного вимірювання просторового розподілу магнітного поля. Однак, відсутність симетрії потенціальних виводів у таких структурах потребує використання нових підходів у побудові схем формування сигналів і детальнішого аналізу залежності їхніх вихідних напруг від вектора індукції магнітного поля. Запропоновано параметричну модель сенсорів магнітного поля на основі лінійок розщеплених холлівських структур, спосіб їх калібрування та основні підходи в побудові просторових структурних моделей засобами FEMLAB та MATLAB.

Ключові слова: холлівські сенсори, розщеплені холлівські структури, двокоординатні сканери магнітного поля, моделювання.

The work gives an analysis of the characteristics of magnetic field scanners on the splitted Hall structures. In contrast to ordinary line magnetic field scanners, the structure of lines of splitted Hall structures gives an opportunity to improve significantly the spatial resolution of two-coordinate measurements of the magnetic-field vector's spatial distribution. However, the absence of potential electrodes symmetry in such structures require new approaches to design of wave-shaping circuits and further analysis of the dependence of their output voltages on the magnetic field vector. A parametric model of magnetic field sensors based on lines of splitted Hall structures, a method of their calibration and main approaches to building spatial structural models by means of FEMLAB and MATLAB are proposed.

Key words: Hall sensor, splitted Hall structure, two-coordinate magnetic field sensors, modeling.

Вступ

На відміну від традиційних елементів Холла з двома потенціальними виходами [1] та симетричною структурою, гальваноманітні сенсори магнітного поля на основі розщеплених

холлівських структур (РХС) ґрунтуються на несиметричних півелементах Холла, здебільшого, з єдиним потенціальним виходом. Використовуючи такі півелементи Холла, формують різноманітні сенсори для вимірювання просторового розподілу магнітного поля, зокрема, двокоординатних 2-D та трикоординатних 3-D зондів. Перевагою РХС є можливість підвищення просторової роздільної здатності та розширення функціональних можливостей.

Ефективним рішенням сенсорів магнітного поля на основі РХС є одночипові 2-D та 3-D сенсори. Їх виготовляють за технологією кремнієвих інтегральних схем і здебільшого поєднують зі схемами сигнального перетворення [2, 3].

Типовими представниками тонкоплівкових РХС є сенсори, чутлива зона яких перебуває в кутовій частині підкладки [4, 5]. Таке конструктивне рішення дозволяє створити 3-D зонд з трьох ортогонально розвернутих кутових РХС, сумістивши їхні чутливі зони в одну просторову точку. Перевагою тонкоплівкових РХС є можливість їх виготовлення на активних шарах з напівпровідників груп $A^{III}B^V$, $A^{II}B^{VI}$. Висока рухливість носіїв заряду в таких напівпровідниках та мінімальна товщина активного шару сенсорів забезпечують поєднання їх високої магнітної чутливості (типово, 100÷300 мВ/Т) та незначних паразитних перехресних зв'язків (< 1%). Важливою є також можливість реалізації таких РХС за масовою технологією традиційних тонкоплівкових сенсорів Холла, що забезпечує мінімальні затрати на освоєння їх виробництва.

Іншим ефективним рішенням сенсорів на основі тонкоплівкових РХС є 2-D сканери магнітного поля. Ці сканери ґрунтуються на двох ортогонально розвернутих лінійках РХС [6, 7]. На відміну від традиційних однокоординатних сканерів магнітного поля (рис. 1, а) з двома струмовими виводами I1, I2 та декількома парами симетричних потенціальних виводів EN1, EN2 (де N – номер пари), лінійка РХС складається з ряду півелементів Холла з єдиним потенціальним виводом EN (рис. 1, б). Просторова роздільна здатність такої РХС визначається відстанями між потенціальними виводами і типово становить 0,1–0,3 мм.

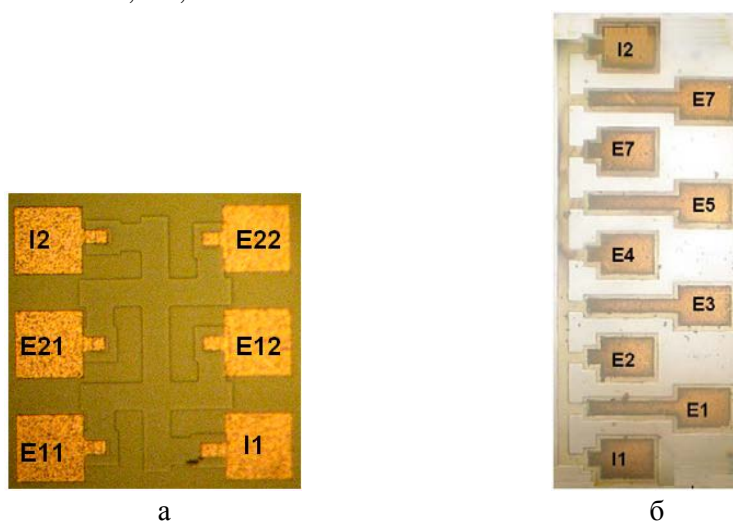


Рис. 1. Фотографії традиційного однокоординатного сканера магнітного поля (а) і лінійки РХС (б)

У цій роботі наведені результати дослідження параметрів та розроблення математичних моделей 2-D сканерів магнітного поля на основі лінійки РХС. Такі 2-D сканери застосовуються для картографування магнітного поля на поверхні феромагнітних матеріалів, зокрема, в задачах діагностики структурної досконалості металічних конструкцій, моніторингу цілісності рейок залізниць, зварних з'єднань тощо. Для проведення вказаної діагностики в досліджуваному матеріалі за допомогою електромагнітів формують тестове магнітне поле, використовуючи результуючий приповерхневий розподіл магнітного поля як інформативну величину структурної досконалості матеріалу.

Принцип функціонування та постановка задачі

Конструкція 2-D сканера магнітного поля на основі РХС наведена на рис. 2. Дві пластини з тонкоплівковими структурами ННSM та ННSP – лінійками РХС – фіксують на суміжних гранях паралелепіпеда так, щоб чутливі зони структур сумішалися вздовж одного ребра. Це ребро слугує чутливим елементом зонда 2-D сканера, дозволяючи вимірювати масив значень двох проекцій (B_{Xi} та B_{Yi}) приповерхневого магнітного поля вздовж ребра (осі Z). Кількість точок масиву визначається кількістю потенціальних виводів лінійки РХС.

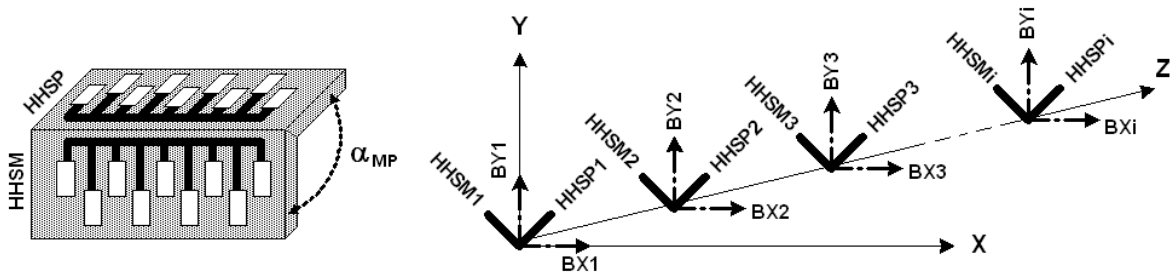


Рис. 2. Конструкція 2-D сканера магнітного поля на основі лінійок РХС

Аналогічно до традиційних елементів Холла та однокоординатних сканерів магнітного поля живлення лінійки РХС здійснюється джерелом постійного струму, зокрема, як це показано на рис. 3, а, – струм через виводи живлення I1, I2 формується джерелом струму IS. Вихідні напруги V[1]...V[7] лінійки РХС формуються на потенціальних виводах E1...E7 півелементів Холла ННС1...ННС7. Оскільки півелементи Холла не мають симетричних потенціальних виводів, існує проблема відокремлення з напруги на єдиному потенціальному виводі РХС холлівської та резистивної складових. Перша з них є корисним сигналом і застосовується для вимірювання магнітної індукції, а друга – паразитною складовою, зумовленою спадом напруги в колі протікання струму живлення.

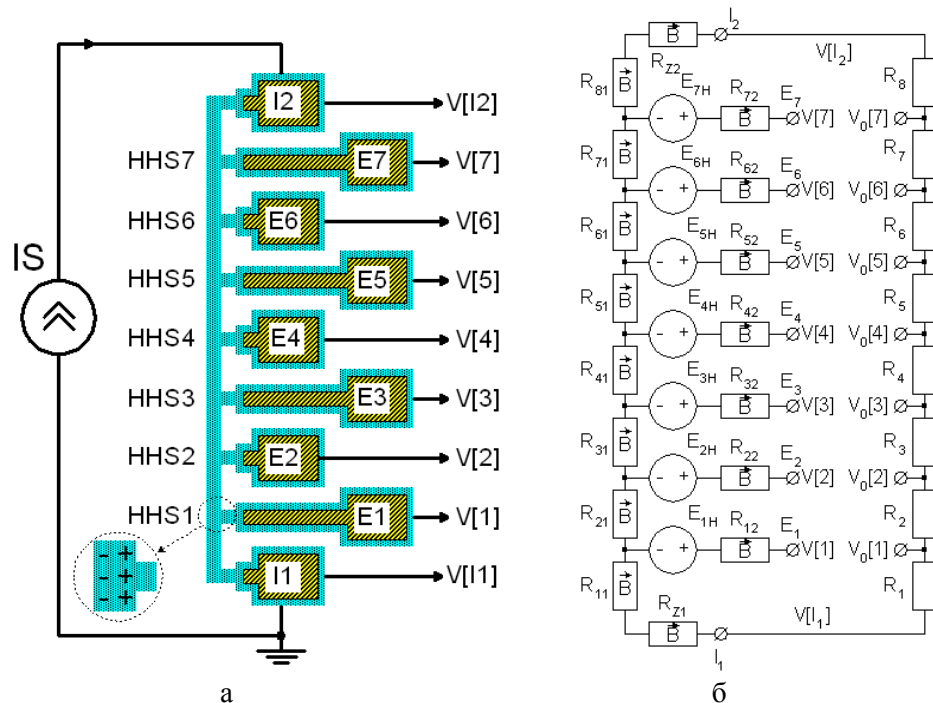


Рис. 3. Схема живлення (а) та формування сигналів (б) лінійки РХС

Відокремлення холлівської складової від резистивної здійснюють шляхом різницевого вимірювання – напруги V[1]...V[7] на потенціальних виводах півелементів Холла вимірюються

відносно опорних потенціалів $V_0[1] \dots V_0[7]$, сформованих резистивним подільником $R_1 \dots R_8$ (рис. 3, б). Оскільки резистивні складові сигналів РХС визначаються падінням напруг на резистивних ділянках $R_{Z1}, R_{11} \dots R_{81}, R_{Z2}$ лінійки РХС, а опір цих ділянок обумовлюється магніторезистивним ефектом і є функцією магнітного поля, напруга живлення резистивного подільника також має визначатися магнітним полем. Для цього на резистивний подільник прикладають різницю напруг $V[I_2] - V[I_1]$, що формується в струмовому колі лінійки РХС. Беручи до уваги відсутність струму в потенціальних колах півелементів Холла, спадом напруги на опорах цих кіл ($R_{12} \dots R_{72}$) можна знехтувати. Отже, результатом різницевого вимірювання буде холлівська складова сигналу, яка наведена на рис. 3, б функціональними джерелами напруги E_H

$$V_H[i] = V[i] - V_0[i] = V(E_H[i]).$$

Результати експериментальних досліджень залежності вихідних напруг лінійки РХС від індукції магнітного поля наведені на рис. 4. Можна бачити, що вихідні напруги $V[i]$ півелементів Холла визначаються переважно резистивною складовою, яка, на відміну від холлівської напруги, є квадратичною функцією магнітного поля (рис. 4, а). Натомість, напруги, отримані різницевим вимірюванням $V_H[i]$, якісно відповідають типовій залежності холлівської напруги від індукції магнітного поля (рис. 4, б).

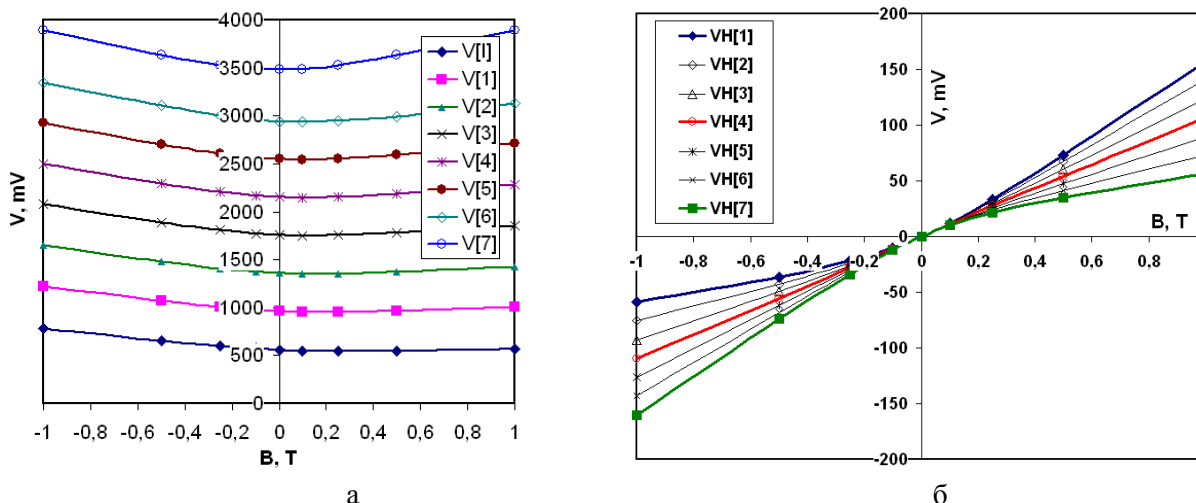


Рис. 4. Вихідні напруги на потенційних виводах $V[i]$ лінійки РХС (а) та результат їх різницевого вимірювання $V_H[i] = V[i] - V_0[i]$ (б)

Все ж використання розглянутого вище способу формування сигналів у лінійках РХС має деякі проблеми. По-перше, як це видно з рис. 4, б, характерною є значна нелінійність функції перетворення (до 50 % в діапазоні $B = -1 \dots 1$ Т) та залежність параметрів цієї функції від номера (розміщення в лінійці) півелементів Холла. По-друге, для практичного використання лінійок РХС в 2-D сканерах необхідно враховувати реальні параметри РХС та вплив на вихідний сигнал довільно напрямленого в просторі вектора індукції магнітного поля. Це потребує нових рішень щодо формування вихідних сигналів лінійок РХС, детального дослідження їхніх польових характеристик, аналізу цих характеристик з погляду калібрування 2-D сканера та розроблення математичної моделі, що адекватно описує резистивні та холлівські складові півелементів Холла.

Дослідження та параметричний аналіз 2-D сканера

Проведений нами структурно-фізичний аналіз експериментально отриманих залежностей вихідних напруг лінійок РХС показав, що основною причиною нелінійності функції перетворення є залежність коефіцієнтів магніторезистивного ефекту від геометричних розмірів структури. В

структурі лінійки PXC це проявляється в порушенні пропорційності розподілу резистивних напруг в струмовому колі при дії на структуру магнітного поля. Відомо [1], що геометричний (безрозмірний) коефіцієнт магнітоопору є обернено-пропорційним до співвідношення довжини до ширини магніторезистора – при збільшенні магнітного поля довші зразки характеризуються меншим значенням відносної зміни опору. Детальніший аналіз непропорційності розподілу резистивних напруг в лінійці PXC проведено з використанням розробленої нами просторової моделі, яка наводиться в наступному підрозділі.

З метою мінімізації впливу нелінійності функції перетворення запропоновано змінити коло живлення лінійки PXC. Відповідно до модифікованої схеми живлення струмове коло лінійки PXC перемикається при перемиканні потенціального кола – для кожного з півелементів Холла струм пропускають через суміжні виводи. Так, при вимірюванні напруги на виводі [i] струм пропускають через виводи [i-1] та [i+1] (рис. 5, а). Таке рішення дозволяє зберегти симетрію струмового кола відносно потенціального виводу, що забезпечує лінійну залежність резистивної складової вихідної напруги від магнітного поля.

Аналогічно вищенаведеному, живлення резистивного подільника відбувається різницею напруг між виводами [i-1] та [i+1], а співвідношення між резисторами подільника відповідають критерію рівності

сформованої цим подільником опорної напруги $V_0[i] = (V[i+1] - V[i-1]) \frac{R_1}{R_1 + R_2}$ напрузі PXC при

нульовому значенні магнітного поля $V_0[i] = V[i]$. Проведені експериментальні дослідження підтвердили високу лінійність вимірної різницею методом напруги від магнітного поля (аналогічно напрузі VH[4], рис. 4, б).

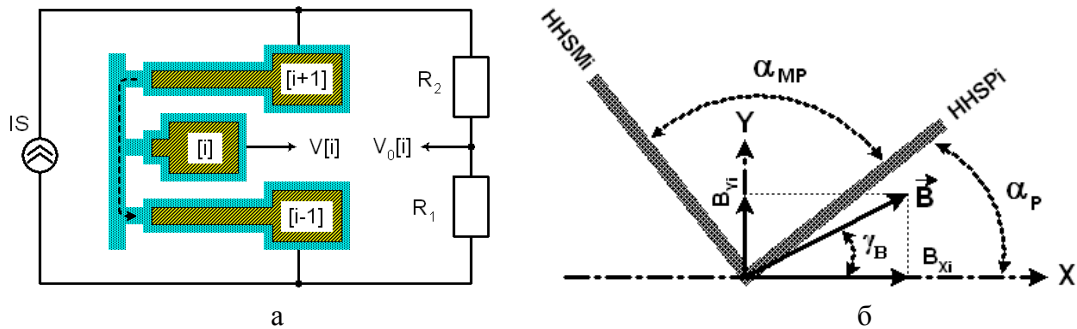


Рис. 5. Модифікована схема живлення (а) та розміщення PXC в магнітному полі (б)

Далі, з метою визначення параметрів 2-D сканера та інтерпретації його сигналів, розглянемо залежність холлівських напруг V_{HPi} та V_{HMi} відповідних сегментів HHSPi та HHSMi двох розміщених під певним кутом лінійок PXC. Ці масиви напруг визначаються індукцією вимірювального поля B та кутом γ_B між вектором індукції та системою координат зонда:

$$\begin{cases} V_{HPi} = S_{HNPi} B \sin(\alpha_P - \gamma_B) \\ V_{HMi} = S_{HNMi} B \sin(\alpha_P + \alpha_{MP} - \gamma_B) \end{cases}'$$

де S_{HNPi} та S_{HNMi} – відповідно, чутливості сегментів HHSPi та HHSMi до нормально напрямлених векторів магнітного поля ; α_P та α_{MP} – кути нахилу пластин HHSP та HHSM в системі координат зонда (рис. 5, б).

Калібрування 2D сканера проводять в однорідному магнітному полі індукцією B_A . З метою розрахунку коефіцієнтів чутливості S_{HNPi} , S_{HNMi} та кутів нахилу α_P , α_{MP} проводять вимірювання масивів вихідних напруг сегментів PXC у двох положеннях 2D сканера. У першому положенні перпендикулярно до вектора індукції магнітного поля \vec{B}_A напрямляють вісь X зонда (тобто, $\gamma_B = 0$), а в другому – вісь Y (тобто, $\gamma_B = \pi/2$). Коефіцієнти і кути розраховують з отриманої системи рівнянь

$$\begin{cases} V_{XHPi} = S_{HNPi} B_A \sin \alpha_p \\ V_{YHPi} = S_{HNPi} B_A \sin(\alpha_p - \pi/2) = S_{HNPi} B_A \cos \alpha_p \\ V_{XHM_i} = S_{HNM_i} B_A \sin(\alpha_p + \alpha_{MP}) \\ V_{YHM_i} = S_{HNM_i} B_A \sin(\alpha_p + \alpha_{MP} - \pi/2) = S_{HNM_i} B_A \cos(\alpha_p + \alpha_{MP}) \end{cases},$$

де V_{XHPi} і V_{XHM_i} – напруги, одержані в першому, а V_{YHPi} і V_{YHM_i} – в другому положенні зонда.

Частковим випадком є ідеальний зонд з ортогональним розміщенням пластин ННСП, ННСМ ($\alpha_{MP} = \pi/2$). В цьому випадку має місце спрощення, що дає таку систему рівнянь:

$$\begin{cases} V_{XHPi} = S_{HNPi} B_A \sin \alpha_p \\ V_{YHPi} = S_{HNPi} B_A \cos \alpha_p \\ V_{XHM_i} = S_{HNM_i} B_A \cos \alpha_p \\ V_{YHM_i} = -S_{HNM_i} B_A \sin \alpha_p \end{cases}$$

Розв'язуючи ці рівняння

$$\begin{aligned} V_{XHPi}^2 + V_{YHPi}^2 &= S_{HNPi}^2 B_A^2 (\sin^2 \alpha_p + \cos^2 \alpha_p) = S_{HNPi}^2 B_A^2 \\ V_{XHM_i}^2 + V_{YHM_i}^2 &= S_{HNM_i}^2 B_A^2 (\sin^2 \alpha_p + \cos^2 \alpha_p) = S_{HNM_i}^2 B_A^2 \end{aligned}$$

отримують значення чутливостей та кута нахилу

$$S_{HNPi} = \frac{\sqrt{V_{XHPi}^2 + V_{YHPi}^2}}{B_A}; \quad S_{HNM_i} = \frac{\sqrt{V_{XHM_i}^2 + V_{YHM_i}^2}}{B_A}; \quad \alpha_p = \arctg\left(\frac{V_{XHPi} S_{HNPi}}{V_{YHPi} S_{HNPi}}\right)$$

За вищезгаданої умови $\alpha_{MP} = \pi/2$ сума квадратів вихідних напруг сенсорів пластин ННСП, ННСМ не залежить від кута γ_B вектора індукції вимірювального магнітного поля

$$\left(\frac{V_{HPi}}{S_{HNPi}}\right)^2 + \left(\frac{V_{HM_i}}{S_{HNM_i}}\right)^2 = B^2 (\sin^2(\alpha_p - \gamma_B) + \cos^2(\alpha_p - \gamma_B)) = B^2.$$

Отже, по-перше, значення вимірювального поля розраховується без врахування кута γ_B

$$B = \sqrt{\left(\frac{V_{HPi}}{S_{HNPi}}\right)^2 + \left(\frac{V_{HM_i}}{S_{HNM_i}}\right)^2},$$

і, по-друге, є можливість проводити періодичну перевірку точності калібрування зонда, під час якої зонд обертають в однорідному магнітному полі, зберігаючи вісь Z зонда перпендикулярною до вектора індукції поля. Критерієм точності калібрування є залежність вимірюваного значення поля B від кута повороту зонда. В ідеальному випадку ця залежність прямує до нуля $B(\gamma_B) \rightarrow 0$. У реальних випадках похибки калібрування зонда оцінюються за максимальним значенням девіації $B(\gamma_B)$.

Метою наступного етапу досліджень було визначення залежності вихідних сигналів лінійки РХС від напрямку вектора індукції магнітного поля. З цією метою підкладка структури лінійки РХС поверталася в однорідному магнітному полі відносно осей L, W та N.

Результати досліджень при поворотах відносно осей L та W підтверджують високу лінійність функції перетворення та відсутність істотного впливу магніторезистивного ефекту на польову характеристику РХС. Так, залежності холлівських напруг $V(\phi_L)$ та $V(\phi_W)$ від кута повороту ϕ_L відносно осі L та ϕ_W відносно осі W описуються функцією косинуса V_{\cos} (рис. 7). Різниця V_D між результатами експериментальних досліджень та значеннями функції косинуса перебували в межах похибки експерименту, що переважно визначалася неточністю встановлення кута повороту механізму обертання.

Точніші дослідження магніторезистивної модуляції проводили при обертанні структури в магнітному полі, вектор індукції якого є паралельним до площини структури сенсора, а вісь обертання збігається з нормаллю N до цієї площини (рис. 6, б). При незначних індукціях поля

($B < 0,3$ Т) залежності вихідної напруги від кута повороту $V_{OUT}(\varphi_N)$ з достатньою точністю можна визначити функцією косинуса з переважаючою першою гармонікою, що визначається холлівською напругою. Це свідчило про відсутність чи, принаймні, незначний вплив на вихідний сигнал магніторезистивної модуляції. Якісна зміна функціональної залежності $V_{OUT}(\varphi_N)$ мала місце при вищих полях ($B > 0,3$ Т).

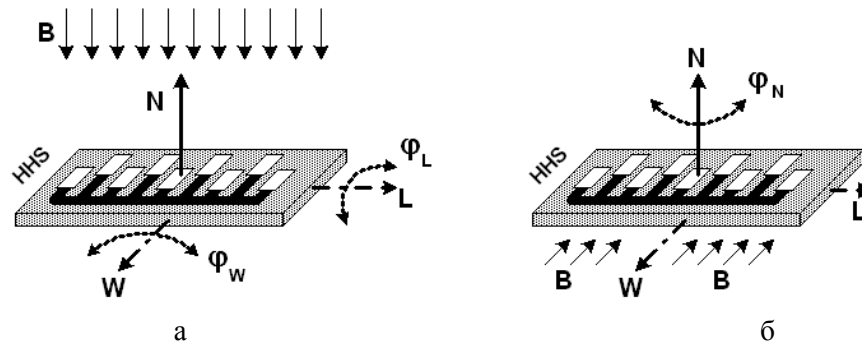


Рис. 6. Напрями поворотів PXC відносно осей L, W (а) та N (б)

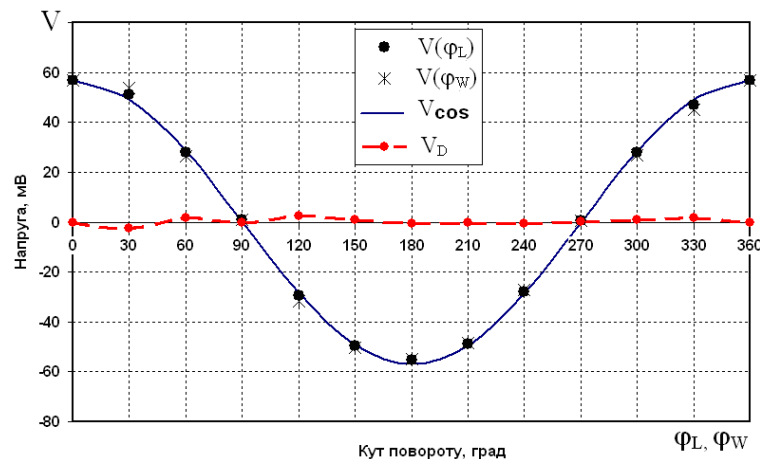


Рис. 7. Залежності холлівських напруг від кутів повороту PXC відносно осей L та W

Зокрема на рис. 8 наведені результати дослідження цієї залежності при $B = 0,5$ Т. Крім вихідної напруги $V_{OUT}(\varphi_N)$, на графіку наведені результати розділення цієї напруги першу $V_1(\varphi_N)$ та другу гармоніки та їхня сума $V_S(\varphi_N) = V_1(\varphi_N) + V_2(\varphi_N)$.

Саме друга гармоніка $V_2(\varphi_N)$ є результатом магніторезистивної модуляції. Максимум обумовленої цією модуляцією напруги спостерігається при паралельному до осі L сенсора напрямі магнітного поля. Враховуючи наведену на рис. 2, б структуру 2-D сканера цей напрям поля збігається з віссю Z. Отже, для забезпечення високої точності вимірювання сильних магнітних полів необхідною є інформація про B_Z складову вектора індукції магнітного поля. Ця інформація може бути отримана шляхом інтегрування в 2-D сканер допоміжних елементів Холла з нормаллю вздовж осі Z [8].

Магнітоопір є квадратичною функцією магнітного поля, а тому напругу магніторезистивної модуляції доцільно зобразити як $V_2(B) = S_{RB} B_Z^2$, де S_{RB} – коефіцієнт магніторезистивної модуляції. Враховуючи, що в наведеному експерименті $B_Z = 0,5$ Т, а максимальне значення другої гармоніки $V_{2M}(0,5 \text{ Т}) \approx 0,8$ мВ, коефіцієнт магніторезистивної модуляції становить $S_{RB} = 3,2$ мВ/Т². У подальших експериментах було підтверджено, що коефіцієнт S_{RB} залишається доволі сталим, зокрема при $B = 1$ Т максимальне значення другої гармоніки зросло приблизно в чотири рази.

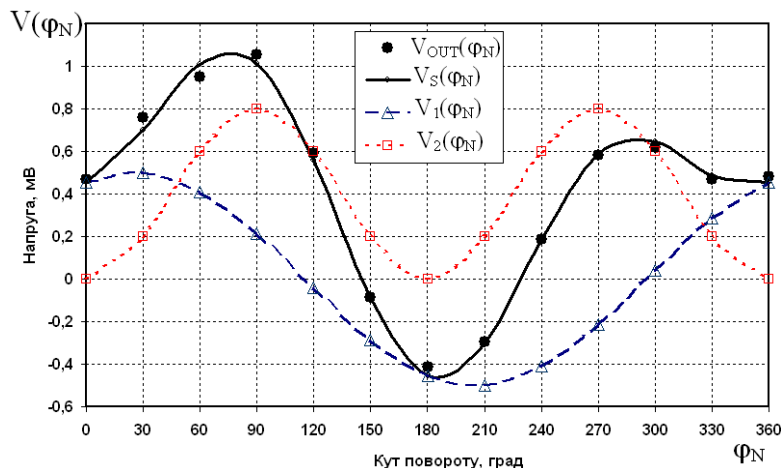


Рис. 8. Залежність напруги $V_{OUT}(j_N)$ та її гармоніки $V_1(j_N)$, $V_2(j_N)$ від кутів повороту РХС відносно осі N

Отже, отримані результати експериментальних досліджень та їх інтерпретація дозволяють уточнити систему параметрів 2-D сканера з урахуванням впливу проекції B_z на результати вимірювання проекцій B_x та B_y вектора індукції магнітного поля.

Математична модель лінійки РХС

У [1] показано, що базовими рівняннями для практично будь-якої модифікації холлівського сенсора є рівняння:

$$-\nabla \cdot E = \Delta j = 0 \tag{1}$$

$$\nabla \cdot J = 0 \tag{2}$$

$$J = e^2 K_1 E + \frac{e^3}{m^*} K_2 [E \times B] + \frac{e^4}{m^{*2}} K_3 B (E \cdot B) \tag{3}$$

де J – густина струму в довільній точці напівпровідника, e та m^* – заряд та ефективна маса носіїв заряду, K_1 , K_2 і K_3 – кінетичні коефіцієнти:

$$K_s = \frac{n}{m^*} \left\langle \frac{t^s}{1 + m^{*2} B^2} \right\rangle, \quad s = 1, 2, 3 \tag{4}$$

де n та m^* – концентрація і рухливість носіїв заряду відповідно, t – час релаксації. Кутові дужки означають усереднення за енергіями електронів.

У разі присутності у зрізці напівпровідника носіїв заряду декількох типів, загальний струм є сумою окремих струмів, забезпечених носіями заряду кожного типу. Рівняння (1) – (4) чинні для сенсора Холла, якщо справджуються такі умови: частоти струму зміщення та магнітного поля є малими; просторовий заряд відсутній в активній ділянці пристрою; немає генерації та рекомбінації носіїв, а також істотних градієнтів густини струму.

Для моделювання були вибрані спеціалізовані пакети FEMLAB і MATLAB, тісно інтегровані між собою. Окрім відкритості коду, можливості самостійного програмування та побудови двомірних та тримірних об'єктів довільної форми, істотною перевагою FEMLAB є можливість задавати основні фізичні величини як функції просторової координати, що є важливим для РХС, де поле і густина струму змінюється від точки до точки. Моделювання розподілу зміни питомого опору РХС в магнітному полі виконувалося, враховуючи те, що поле в кожній точці РХС є суперпозицією напруг Холла та поля, еквівалентного за дією силі Лоренца.

Початковим етапом розроблення моделі був синтез елементарної геометрії напівпровідникової структури у формі прямокутної пластини, опис її електрофізичних параметрів та електричних полів. Потім модельним дослідженням розподілу потенціалів в пластині, проводилися адаптація та

верифікація розподілу напруг Холла. Зокрема, на рис. 9, а показано приклади моделювання просторового розподілу напруги у зразках різної довжини, на рис. 9, б – розподілу напруги Холла вздовж граней напівпровідникової структури.

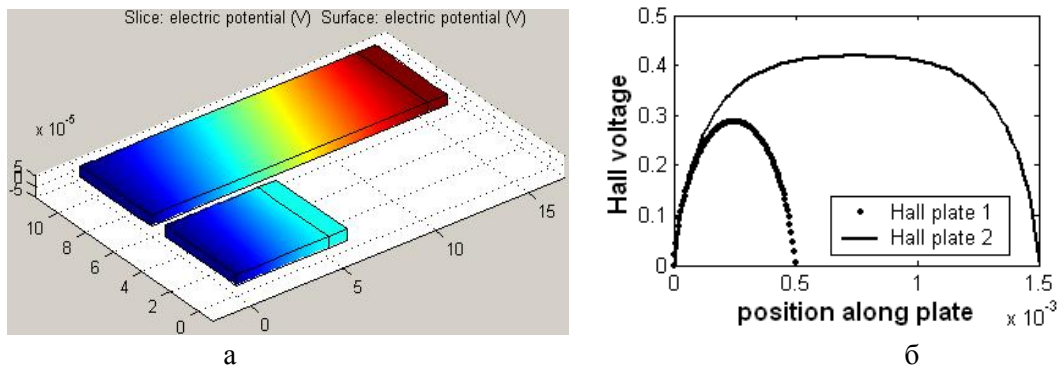


Рис. 9. Розподіл потенціалу (а) та холлівської напруги (б) у двох напівпровідникових пластинах

Наступним етапом було проведено моделювання зміни питомого опору структури в магнітному полі. Для цього використовувалося рівняння

$$-\nabla \cdot (c\nabla V + aV - g) + a \cdot V + b \cdot \nabla V = f \quad (5)$$

Коефіцієнтам рівняння присвоєно такі значення: $c = -1$; $g = [E_x \ E_y \ E_z]$; $a = f = a = b = 0$.

Вектор $g = [E_x \ E_y \ E_z]$ є вектором напруженості електричного поля, що задається як $J \cdot r_B - E_{Hall} + m r_B [J \times B]$, де B – вектор магнітної індукції, J та E_{Hall} – вектори густини струму та поля Холла в конкретній точці напівпровідникового взірця, а ρ_B – питомий опір матеріалу в конкретному магнітному полі, що прийнятий $r_B = r_0 \cdot (1 + m^2 B^2)$, де ρ_0 – питомий опір матеріалу за відсутності магнітного поля, B^2 – квадрат величини проекції вектора магнітної індукції на нормаль до площини напівпровідникової пластини.

На рис. 10, а показано результат моделювання розподілу приросту питомого опору вздовж напівпровідникової пластини. Оскільки напівпровідниковий взірець у формі паралелепіпеда можна подати як послідовне з'єднання ділянок з безмежно малою довжиною та однаковою площею перерізу, то питомий опір цілого взірця є середнім арифметичним значень питомого опору всіх таких ділянок. Як показує аналіз кривої розподілу зміни питомого опору, питомий опір ділянки між першим струмовим електродом та будь-якою точкою перевищує середній питомий опір взірця, якщо повздовжня координата цієї точки є меншою за координату серединної точки, а в протилежному випадку питомий опір ділянки є меншим за середній питомий опір взірця.

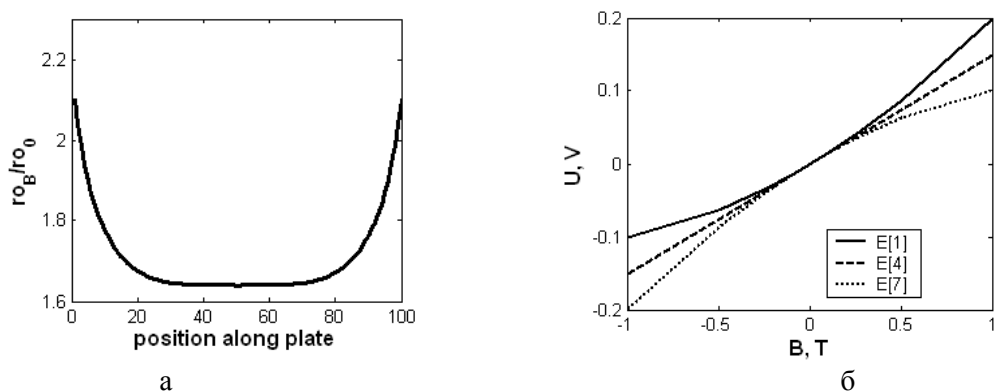


Рис. 10. Моделювання розподілу приросту питомого опору під впливом магнітного поля вздовж напрямку протікання струму (а) та напруги Холла на електродах E[1], E[4], E[7] (б)

Цей результат модельного дослідження пояснює отримані експериментально результати нелінійних польових залежностей напруг Холла в структурі лінійки РХС (рис. 4) – на середньому електроді вона є майже лінійною, а для решти електродів спостерігається або занижена, або завищена оцінка резистивної складової напруги, причому нелінійність виражена тим сильніше, чим менша відстань від потенціального електрода до струмового електрода. Відтворені модельним дослідженням нелінійні польові залежності напруг Холла на першому E[1], четвертому E[4] та сьомому E[7] електродах зображені на рис. 10, б.

На завершальному етапі була синтезована просторова модель лінійки РХС (рис. 11, а) та проводилися модельні дослідження залежності розподілу приросту її питомого опору від проекції вектора магнітної індукції на площину РХС. Враховуючи, що контактні площадки лінійки РХС винесені за межі її чутливої зони, вплив металічних областей електродів на характеристики сенсора не розглядався. Приклад модельного дослідження розподілу питомого опору вздовж взірця у випадку, коли складова вектора магнітної індукції, паралельна напрямку протікання струму, є вдвічі більшою за проекцію вектора магнітної індукції на нормаль до площини чутливого напівпровідникового шару, а проекція, паралельна площині сканера та перпендикулярна напрямку протікання струму, дорівнює нулю, наведений на рис. 11, б. Графік $r_{0\text{geom}}/r_{00}$ характеризує геометричний, $r_{0\text{phys}}/r_{00}$ – фізичний магніторезистивний ефект, а графік $r_{0\text{total}}/r_{00}$ – загальний магніторезистивний ефект, спричинений зокрема і паралельною до чутливого шару складовою вектора магнітної індукції. Отже, розроблена засобами FEMLAB і MATLAB просторова модель та результати її дослідження підтверджують наведені вище експериментальні дані, і зокрема, нелінійні польові залежності напруг на електродах лінійки РХС та вплив на ці напруги паралельної до чутливого шару складової вектора магнітної індукції.

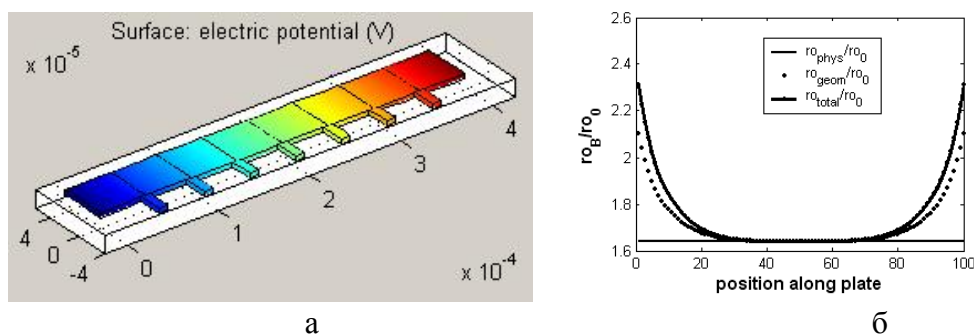


Рис. 11. Просторова модель РХС (а) та розподіл приросту її питомого опору з урахуванням паралельної до її площини складової вектора магнітної індукції (б)

Висновки

Наведено аналіз характеристик 2-D сканерів магнітного поля на основі лінійок РХС. Їх конструкція забезпечує високу просторову роздільну здатність двокоординатного картографування приповерхневих магнітних полів, що є пріоритетним, зокрема, в діагностиці структурної досконалості металічних конструкцій та їх зварних з'єднань. Показано що відсутність симетрії потенціальних виводів в РХС зумовлює нелінійність їх функції перетворення, а отже, необхідність в нових підходах аналізу польових характеристик РХС. Основними науковими результатами роботи є спосіб параметричного аналізу та підходи в побудові просторових структурних моделей засобами FEMLAB та MATLAB. Отримані результати експериментальних досліджень та їх інтерпретація дозволили уточнити систему параметрів 2-D сканера з урахуванням впливу проекції B_z на результати вимірювання проекцій B_x та B_y вектора індукції магнітного поля.

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.*

А 67. – 1998. – Р. 72–76. 4. Пат. № 72832 Україна, МКИ 7 G 01 R 33/06, H 01 L 43/06. Вимірювальний перетворювач магнітного поля / І.А. Большакова, Р.Л. Голяка (Україна). – № 2003065533; Заявлено 13.06.03; Опубл. 15.04.05, Бюл. №4. 5. Пат. № 73816 Україна, МКИ 7 G 01 R 33/06. Вимірювальний перетворювач магнітного поля / І.А. Большакова, Р.Л. Голяка (Україна). – № 2003065532; Заявлено 13.06.03; Опубл. 15.09.05, Бюл. №9. 6. Большакова І.А., Голяка Р.Л., Макидо О.Ю., Марусенкова Т.А. Нові конструкції напівпровідникових тонкоплівкових 3-D сенсорів магнітного поля // *Електроніка і зв'язь*. – 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 // *Вісник Національного університету „Львівська політехніка”*. – 2009. – № 646: *Електроніка*. – С. 38–46. 8. Деклараційний патент на корисну модель № и 201012287. Вимірювальний перетворювач магнітного поля. від 18.10.2010 / З.Ю. Готра, І.А. Большакова, Р.Л. Голяка, Т.А. Марусенкова.

УДК 621.315.592

М.М. Ваків^{1,2}, С.І. Круковський², В.Р. Тимчишин^{1,2}¹Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра напівпровідникової електроніки,²Науково-виробниче підприємство "Карат"

НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНА РІДИННОФАЗНА ЕПІТАКСІЯ p-Si ШАРІВ У СКЛАДІ p-i-n Si ВИСОКОВОЛЬТНИХ СТРУКТУР

Ó Ваків М.М., Круковський С.І., Тимчишин В.Р., 2011

M.M. Vakiv, S.I. Krukovsky, V.R. Tumchushun

LOW-TEMPERATURE LIQUID-PHASE EPITAXY OF p-Si LAYERS IN COMPOSITION OF p-i-n Si HIGH-VOLTAGE STRUCTURES

Ó Vakiv M.M., Krukovsky S.I., Tumchushun V.R., 2011

Досліджено, що в галієвих розчинах із вмістом алюмінію $\approx 0,2$ ваг. % забезпечується найкраща морфологія травленої поверхні кремнієвих підкладок. Показано, що додавання алюмінію від 0 до 1,6 ваг. % у галієвий розплав забезпечує можливість кристалізації сильно легованих шарів кремнію р-типу провідності в температурному інтервалі 750–650 °С.

Ключові слова: сильно леговані шари, епітаксіальні структури, висока підстава, відчутний опір.

It is investigated, that the best chemical etching morphology of silicon substrate is provided in gallium melts with content of aluminium $\approx 0,2$ weight %. It is shown that extension of aluminium from 0 to 1,6 weight % into gallium melt provides crystallization capability of heavily doped silicon layers of p-type conductivity at 750–650 °C temperature range.

Key words: liquid-phase epitaxy, heavily doped layers, epitaxial structures, the high substrate, resistivity.

Сьогодні для формування високовольтних p-i-n епітаксійних структур на кремнії з пробивною напругою 1000 В і більше використовується традиційний дифузійний спосіб. Згідно з цим способом формування р- та n-шарів відбувається завдяки дифузії акцепторних та донорних