

Г.І. Барило, Р.Л. Голяка, Т.А. Марусенкова, М.С. Івах

Структура та 3-D модель твердотілого тонкоплівкового сенсора магнітного поля

Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна, roman.l.holiaka@lpnu.ua

Векторні 3-D сенсори магнітного поля становлять основу вимірювальних пристроїв для картографування магнітного поля та магнітного трекінгу. Здебільшого, в таких 3-D сенсорах використовують спеціальні конструкції на основі розщеплених холлівських структур (РХС). Конструкція 3-D сенсора магнітного поля на основі РХС – це об'ємна напівпровідникова інтегральна структура з 8-ма і більше виводами, комбінуючи проходження струму через які та вимірюючи відповідні напруги, визначають складові поля V_x , V_y , V_z . В даній роботі представлено нова структурна реалізація 3-D твердотілих сенсорів магнітного поля, яка не потребує ізоляції p-n переходами та може бути реалізованою на тонкоплівковій межа-технології традиційних холлівських перетворювачів, зокрема на основі плівок антимоніду індію (InSb). Крім того, в роботі представлена SPICE модель 3-D сенсора магнітного поля, з використанням якої вирішується задача розробки та оптимізації методики калібрування запропонованого сенсора.

Ключові слова: 3-D сенсор магнітного поля, розщеплена холлівська структура, SPICE модель.

Подано до редакції 07.05.2021; прийнято до друку 27.07.2021.

Вступ

В даний час має місце значна зацікавленість 3-Dimensions (3-D) сенсорами магнітного поля, які дозволяють проводити вимірювання вектора індукції магнітного поля, а саме, його трьох ортогональних проєкцій V_x , V_y та V_z . В таких 3-D сенсорах використовують спеціальні конструкції з поєднанням горизонтальних (нормальних) та вертикальних (тангенціальних) холлівських перетворювачів, розщеплених холлівських структур (РХС) чи магнітотранзисторів. Векторні 3-D сенсори магнітного поля, здебільшого, становлять основу вимірювальних пристроїв для картографування магнітного поля та визначення просторової локації об'єктів в опорному (reference) магнітному полі, зокрема, в тематиці магнітного трекінгу [1].

Конструкція 3-D сенсора магнітного поля на основі РХС – це об'ємна напівпровідникова інтегральна структура з 8-ма і більше виводами, комбінуючи проходження струму через які та

вимірюючи відповідні напруги, визначають складові поля V_x , V_y , V_z . У структуру інтегрального 3-D сенсора типово входять один конструктивний елемент, який виконує функцію традиційного РХС, вісь чутливості якого (Z-вісь) збігається з нормаллю до площини напівпровідникового шару, та два конструктивні елементи, осі чутливості яких (X-вісь та Y-вісь) є паралельними до площини напівпровідникового шару. Ці два конструктивні елементи називають вертикальними РХС. Конструкція магнітотранзисторів – це об'ємна напівпровідникова інтегральна структура на основі двоколекторних латеральних транзисторів, геометрія яких оптимізована з точки зору забезпечення високої чутливості колекторних струмів від магнітного поля.

Важливо відзначити, що для виготовлення вищезгаданих 3-D сенсорів, як на основі вертикальних РХС, так і на основі магнітотранзисторів, необхідно використовувати структури, які формуються лише методами технології твердотілих інтегральних схем на кремнії. Однак, такі структури, і, в першу чергу їх p-n

переходи, характеризуються низькою радіаційною та температурною стійкістю, що обмежує сферу застосувань більшості існуючих типів 3-D сенсорів.

Актуальність створення векторних 3-D сенсорів магнітного поля нового покоління, зокрема, для екстремальних умов експлуатації обумовлена їх застосуванням в космосі, прискорювачах заряджених частинок, реакторах термоядерного синтезу. В даній роботі представлено нова структурна реалізація 3-D сенсорів магнітного поля, яка не потребує ізоляції p-n переходами та може бути реалізованою на тонкоплівковій меза-технології традиційних холівських перетворювачів, зокрема на основі плівок антимоніду індію (InSb). Це дозволяє створювати 3-D сенсори для жорстких умов експлуатації, зокрема, для діагностики магнітного поля в реакторах термоядерного синтезу чи підвищеної радіації в пристроях ліквідації техногенних катастроф. Крім того, в роботі представлена SPICE модель 3-D сенсора магнітного поля, з використанням якої вирішується задача розробки та оптимізації методики калібрування запропонованого сенсора.

I. Літературний огляд

На прикладах сучасних наукових публікацій розглянемо характерні задачі розроблення, дослідження та застосування 3-D сенсорів магнітного поля. Зокрема, в [2] запропоновано векторний сенсор магнітного поля на основі магнітоелектричних тонкоплівкових композитів, в [3] – монолітний інтегральний 3-D сенсор магнітного поля на основі MEMS технологій, в [4] – одночиповий інтегральний 3-D сенсор Холла, в [5] – 3-D сенсор на основі магнітотранзисторів, в [6] – 3-D магнітотранзистор з низькою потужністю енергоспоживання на основі КМДН (Комплементарна Метал-Діелектрик-Напівпровідник) технології.

Дослідження параметрів різноманітних інтегрованих 3-D сенсорів представлені в [7], планаризація, виготовлення та характеристика таких сенсорів – в [8], аналіз паразитної перехресної чутливості та її корекція в кругових 3-D матрицях сенсорів – в [9], проблеми розуміння та перехресної чутливості у вертикальних холівських сенсорах - в [10].

В літературі розглядаються питання функціонального інтегрування 3-D сенсорів магнітного поля з іншими сенсорними технологіями, зокрема, це - функціонально інтегровані термомагнітні сенсори [11] та гнучкі магнітні 3-D сенсори механічного напруження [12]. 3-D сенсори магнітного поля для інерціальних вимірювальних модулів представлені в [13]. Використання 3-D сенсорів в задачах магнітного трекінгу представлені в [14] та [15], а в задачах лабораторного оснащення - в [16]. 3-D структури кремній на ізоляторі SOI (Silicon on Insulator) для систем на чіпі SoC (System-on-Chip) розглядаються в [17], а їх моделювання – в [18].

Проблематика моделювання 3-D сенсорів представлена в численних роботах, зокрема, в

тонкоплівкових магнітних сенсорах на ефекті гігантського магнітоімпедансу [19], в сенсорах просторового положення з 6-ма степенями свободи DOF (Degrees Of Freedom) [20], в розчеплених холівських структурах [21]. Важливими питаннями моделювання 3-D сенсорів є встановлення закономірностей для розроблення методик їх калібрування, зокрема, використовуючи метод довільних обертань [22].

З метою розроблення 3-D моделі представленої в даній роботі структури твердотілого тонкоплівкового сенсора магнітного поля використано методи SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) моделювання. SPICE моделі охоплюють широкий ряд твердотілих пристроїв, зокрема, резисторів, конденсаторів, котушок індуктивності, діодів, транзисторів. Сучасні версії SPICE охоплюють моделі керованих джерел та струму, моделі трансмісійних ліній, багаторівневі моделі польових та біполярних транзисторів тощо.

В даній час наукова проблематика SPICE моделювання охоплює широкий спектр задач, зокрема, розроблення моделей мемрісторів [23], фероелектричних транзисторів [24], термоелектричних модулів [25]. SPICE моделювання сенсорів магнітного поля розглядається в наукових роботах, що охоплюють проблеми аналізу їх часових [26] та польових характеристик [27], в тому числі характеристик вертикальних холівських сенсорів з сигнальним перетворювачем [28].

Аналіз вищенаведених літературних джерел демонструє актуальність тематики 3-D сенсорів магнітного поля, їх моделювання та застосування.

II. Структура та принцип функціонування

Новизною представлено в даній роботі підходу є можливість виготовлення 3-D сенсорів магнітного поля по тонкоплівковій технології. В тонкоплівковий 3-D сенсор входять два однакові за формою та ортогонально розвернені вертикальні PXC. Спрощена конструкція одного з них, а саме перетворювача для вимірювання V_x проекції вектора індукції магнітного поля, наведена на рис. 1, де: 1 – підкладка, 2 – напівпровідникова активна область; 3 – центральний струмовий контакт, 4, 5 – бокові струмові контакти; 6, 7 – потенційні контакти; 8, 9 – допоміжні області; 10, 11 – проміжні області. Там же показано переріз (A-A) вертикальної PXC та напрямки проекцій індукції магнітного поля. Проекції V_x , V_y знаходяться в площині перетворювача, а проекція V_z є перпендикулярною до цієї площини.

Спрощено процес виготовлення структури є наступним. На високоомній GaAs підкладці формують напівпровідникову епітаксію плівку InSb товщиною $h_1 = 10$ мкм з концентрацією легуючої домішки $N = 10^{16} \div 10^{17}$ см⁻³. Поверх InSb плівки наноситься контактна система (металізація Au, Cu або інша), яка забезпечує низькоомний омичний контакт до InSb та служить контактними площадками. Для виготовлення структур

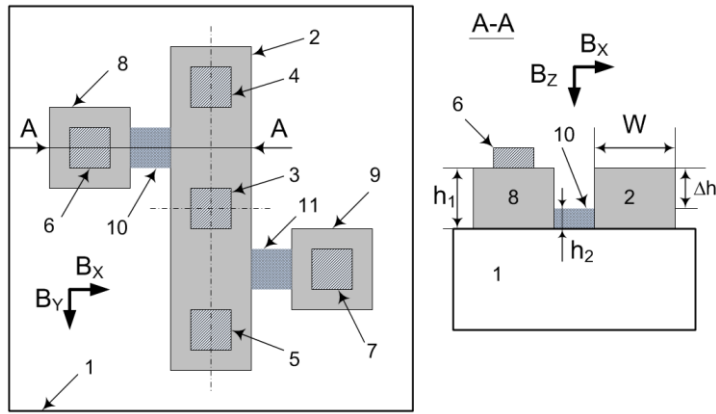


Рис. 1. Конструкція тонкоплівкового вертикального РХС.

проводиться у три етапи. Перший етап призначений для витравлення контактної системи, другий – для витравлення InSb плівки на всю товщину h_1 , а третій – для витравлення InSb плівки на $\approx 90\%$ її товщини – h_2 . Саме таке неповне витравлення напівпровідникової плівки в певних областях структури та відповідна геометрія цієї структури дозволяє реалізувати тонкоплівковий 3-D сенсор магнітного поля. Принципово важливим є те, що товщина проміжних областей $h_2 - 10, 11$ є значно меншою за товщину активної області 2.

Новим рішенням є принцип формування сигналів та конструкція базового елемента таких 3-D сенсорів – вертикальної РХС. На відміну від відомих рішень, потенційні (холлівські) виводи вертикального РХС формуються не на поверхні напівпровідникового шару, а в його глибині – в перехідній області Δh між шаром напівпровідника та діелектричною чи високоомною напівпровідниковою підкладкою. Це дозволяє виготовити такі сенсори без р-n переходів та діелектричного шару між шаром напівпровідника та шаром металізації.

Принцип дії тонкоплівкової вертикальної РХС є наступним. Перетворювач під'єднують до джерела живлення, типово джерела постійного струму. Для цього центральний струмовий контакт 3 під'єднують до першого виводу джерела живлення, а бокові струмові виводи 4, 5 з'єднують разом та під'єднують до другого виводу джерела живлення. Таким чином, струм в робочій області перетворювача розподіляється порівну та тече у взаємно протилежних напрямках відносно центрального струмового виводу.

Наступним етапом є формування сигналів та конструкція базового елемента таких 3-D сенсорів – вертикальної РХС. На відміну від відомих рішень, потенційні (холлівські) виводи вертикального РХС формуються не на поверхні напівпровідникового шару, а в його глибині – в перехідній області Δh між шаром напівпровідника та діелектричною чи високоомною напівпровідниковою підкладкою. Це дозволяє виготовити такі сенсори без р-n переходів та діелектричного шару між шаром напівпровідника та шаром металізації.

проміжними областями 10 та 11. Як це вже було відзначено, товщина проміжних областей 10 та 11 є значно меншою ніж товщина активної області 2, що забезпечує формування на потенційних виводах 6 та 7 потенціалів саме нижньої поверхні активної області.

В загальному випадку напруги на потенційних виводах 6, 7 складаються з трьох компонент. Перша компонента V_R обумовлена падінням напруги на напівпровідниковій робочій області 2. Враховуючи симетрію активної області відносно першого струмового контакту 3, перша компонента напруги на обох потенційних контактах 6, 7 є однаковою $V_R(6) = V_R(7)$. Друга компонента V_Z обумовлена впливом проекції B_z вектора індукції магнітного поля, яка є перпендикулярною до площини перетворювача. Враховуючи конструкцію перетворювача та напрямки протікання струму в ньому, друга компонента напруги на потенційних контактах 6 та 7 також є однаковою $V_Z(6) = V_Z(7)$. Третя компонента V_X обумовлена впливом проекції B_x вектора індукції. На відміну від двох вище відзначених, ця компонента на потенційних контактах 6 та 7 має протилежні знаки $V_X(6) = -V_X(7)$. Зокрема, якщо у верхній (рис. 2) частині активної області 2 носії заряду під дією сили Лоренца відхиляються до верхньої поверхні напівпровідникового шару, то в нижній частині – до нижньої поверхні (в напрямку підкладки). Обумовлена цим відхиленням носіїв різниця потенціалів через проміжні області 10 та 11 передається на потенційні контакти 6 та 7. Необхідно відзначити, що проекція B_y вектора індукції магнітного поля, яка є паралельною напрямку протікання струму через активну область, не обумовлює відхилення носіїв, а отже нею можна знехтувати: $V_Y(6) = V_Y(7) = 0$.

Таким чином, різниця напруги між потенційними виводами 6 та 7 визначається лише проекцією B_x вектора індукції магнітного поля, і в першому наближенні не залежить від інших проекцій вектора:

$$V_{OUT} = [V_R(6) + V_X(6) + V_Y(6) + V_Z(6)] - [V_R(7) + V_X(7) + V_Y(7) + V_Z(7)] = V_X,$$

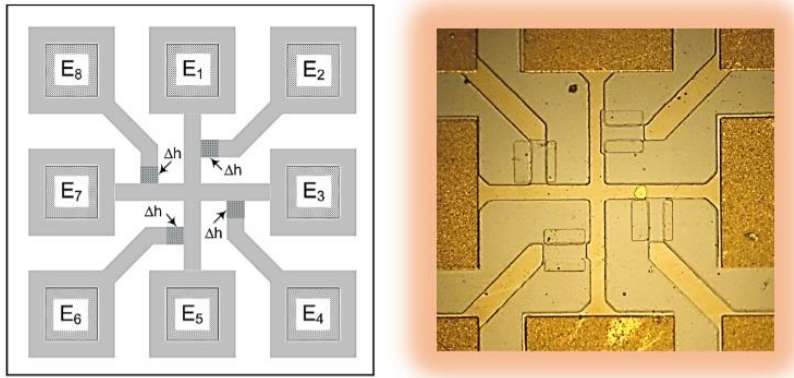


Рис. 2. Топологія та фотографія тонкоплівкового 3-D сенсора.

де $V_X = V_X(6) + V_X(7)$.

Як це вище відзначалось, в запропонований нами тонкоплівковий 3-D сенсор, входять дві ортогонально розвернені вертикальні РХС, які забезпечують чутливість до проекцій V_x , V_y вектора індукції поля, та чутливий до проекції V_z горизонтальний холлівський сенсор.

Топологія та фотографія активної частини тонкоплівкового 3-D сенсора наведена на рис. 2. Активною областю горизонтального холлівського сенсора є центральна частина 3-D сенсора, тобто область перехрещення двох ортогонально розвернутих вертикальних РХС. Очевидно, що таке рішення не дозволяє розмістити в центральній частині струмовий контакт 3, який був показаний на рис. 1.

Ця проблема вирішується оригінальним способом живлення 3-D сенсора. При вимірюванні проекцій V_x , V_y виводи E_1 та E_5 структури 3-D сенсора (рис. 2) під'єднуються до плюсового виводу джерела живлення, а виводи E_3 та E_7 – до мінусового виводу. Це забезпечує два розгалужені взаємно протилежні потоки струму – від виводу E_1 струм тече вниз до центру структури, від виводу E_5 – вверх до центру. Далі, в центрі структури ці два потоки з'єднуються і знову розгалужуються у двох взаємно протилежних напрямках – від центру направо до виводу E_3 та наліво до виводу E_7 . Наявність взаємно протилежних напрямків проходження струму в структурі запропонованого 3-D сенсора є визначальною умовою формування різниць напруги на потенційних виводах $V(E_6) - V(E_2)$ та $V(E_8) - V(E_4)$, які є інформативними сигналами при вимірюванні, відповідно, V_x та V_y проекцій вектора індукції магнітного поля.

При вимірюванні нормальної по площини сенсора складової V_z використовується лише чотири виводи, зокрема, виводи E_1 та E_5 використовуються в якості струмових, а виводи E_3 та E_7 – в якості потенційних (традиційна схема використання горизонтальних холлівських сенсорів).

Для забезпечення однакових рівнів чутливості всіх трьох РХС 3-D сенсора необхідно врахувати наступне. На відміну від традиційних горизонтальних холлівських сенсорів, в яких чутливість є обернено пропорційною функцією

товщини шару напівпровідникової активної області, чутливість вертикальних РХС є обернено пропорційною функцією ширини W напівпровідникової області (рис. 1). Тому рекомендується, щоб ширина W активної області була мінімальною і приблизно рівною товщині h_1 напівпровідникового шару.

III. SPICE модель

На відміну від традиційних холлівських сенсорів, РХС характеризуються суттєво складнішими функціями вимірювального перетворення, а отримання сигналів вимагає більш складних сигнальних перетворювачів. Саме тому використання уніфікованих підходів схемного моделювання в середовищі SPICE дозволяє спростити синтез та аналіз схем заміщення РХС. Використовуючи отримані в результаті аналізу цих схем сімейства сигналів та порівнюючи з результатами експериментальних досліджень, проводять уточнення моделі РХС, а далі – формують масиви даних, що використовуються для створення методик калібрування.

Відзначимо, що безпосереднє використання SPICE та пакетів на його основі для моделювання сенсорів магнітного поля є неможливим. По-перше, у SPICE бібліотеках не передбачені параметри магнітного поля. По-друге, модельний аналіз холлівських сенсорів, і особливо коли мова йде про конструктивно складні сенсорні на основі РХС, повинен передбачати зміну не лише індукції магнітного поля, але і просторового положення сенсора в магнітному полі. Причому, в залежності від типу задачі модельного аналізу, аргументами функції може бути модуль вектора поля, проекції цього вектора на систему координат сенсора (його просторове положення), параметри структури сенсора чи температура.

Для вирішення вказаної проблеми нами розроблені базові підходи синтезу моделей РХС на основі схем заміщення, параметри елементів яких (напруга, струм, опір) керуються (модуються) формальними аналогами. Такими формальними аналогами є параметри допоміжних схемних

компонентів, які формально описують кількісні характеристики (числові значення) магнітного поля, просторового положення сенсора в магнітному полі та коефіцієнтів функціональної характеристики сенсора, зокрема, чутливість, напругу зміщення (off-set), вхідний та вихідний опір тощо.

В бібліотеках SPICE та MicroCAP є широкий ряд типових компонентів – резисторів, конденсаторів, діодів, транзисторів, а також керовані джерела напруги та струму (VofV, VofI, IofV, IofI, NFV тощо) – компоненти моделей, синтаксис яких дозволяє у табличному або аналітичному вигляді задати залежність вихідної величини джерела від певних напруг чи струмів схеми. З точки зору задачі розроблення схем заміщення РХС необхідними вимогами до моделей елементів, що синтезують ці схеми, є можливість аналітичного опису:

- керованих джерел напруги для моделювання холлівських напруг;
- керованих резисторів для моделювання омічних складових сигналу;
- функціональних взаємозв'язків між параметрами холлівських сенсорів та проєкціями вектора індукції магнітного поля, що реалізуються формальними аналогами і описуються з використанням тригонометричних функціональних залежностей, зокрема, залежностей холлівських та омічних складових сигналу від кута нахилу сенсора в магнітному полі.

Проведений нами аналіз функціональних та параметричних можливостей керованих джерел показав, що для синтезу холлівських напруг найбільш доцільними є керовані джерела напруги типу NFV.

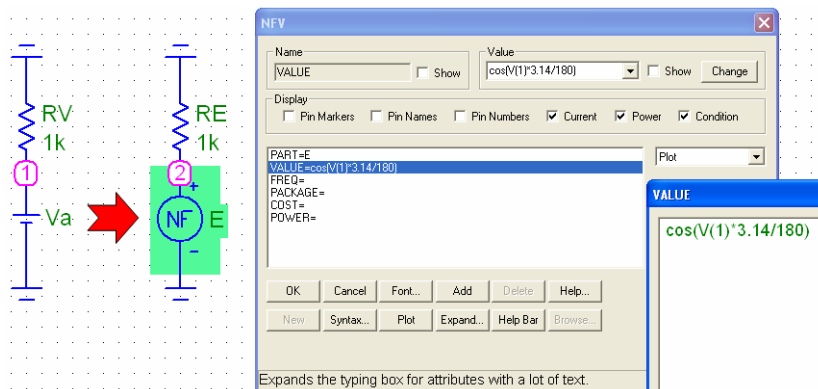


Рис. 3. Приклад схеми керування джерелом напруги типу NFV.

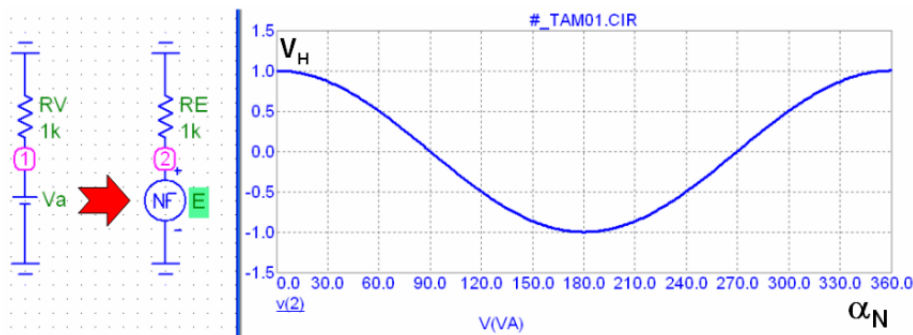


Рис. 4. Приклад модельної аналогії між холлівською напругою V_H та кутом α_N .

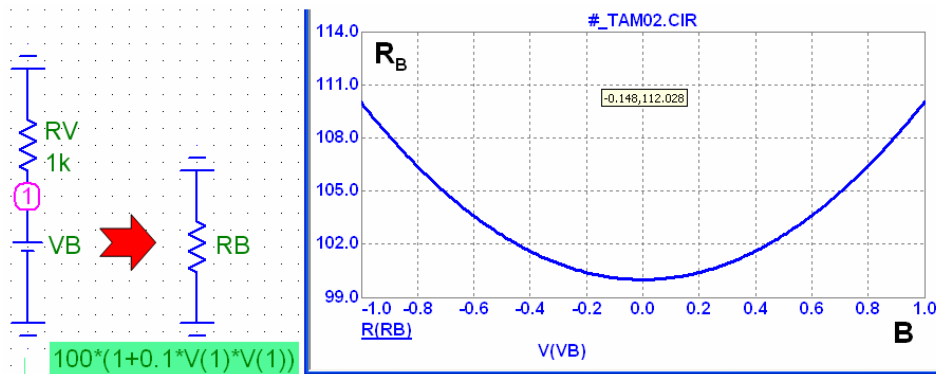


Рис. 5. Приклад специфікації моделі магніторезистивної структури.

Функціональну залежність холлівської напруги від кута α_N між вектором індукції B магнітного поля та нормаллю N до площини сенсора $V_H = V_M \cos \alpha_N$ формально запишемо у вигляді аналітичного виразу $V(E) = V_M \cos(V(1) \cdot \pi / 180)$, де $V(E)$ – напруга NFV джерела E ; $V_M = 1$ В – нормоване значення максимальної напруги; $V(1)$ – напруга у вузлі (1), що формується джерелом напруги V_a – формального аналога кута нахилу $V(1) = V(V_a) \equiv \alpha_N$ (рис. 3). Приклад отриманої таким чином модельної аналогії наведений на рис. 4.

Для синтезу магніторезистивної структури сенсора застосуємо модель функціонального резистора, опір якого можна задати аналітично. На рис. 5 наведено приклад результату синтезу квадратичної залежності опору R_B резистивної структури сенсора від індукції B магнітного поля

$R_B(B) = R_0(1 + K_{RB}B^2)$ у вигляді формальної залежності $R(R_1) = R_0(1 + K_{RB}V(1)^2)$, де $R_0 = 100$ – опір при $B = 0$; K_{RB} – квадратичний коефіцієнт магнітоопору; $V(1) = V(VB) \equiv B$ – формальний

аналог індукції поля.

Використовуючи вищезгадані підходи приклади специфікації компонентів, була синтезована схема заміщення SPICE моделі представленого на рис. 2 векторного тонкоплівкового сенсора (рис. 6). Функціональними компонентами, що використовуються формальним аналогами представленої моделі є:

- VB – аналог модуля вектора індукції B ;
- Valf та Vbet – аналоги кутів α та β нахилу вектора індукції відносно площини PXC;
- RE та RV – аналоги коефіцієнта магнітоопору;
- EBX, EBY, EBZ – аналоги холлівських напруг PXC відносно осей X, Y, Z.

Розміщення та з'єднання цих функціональних компонентів може бути довільним, оскільки інформативною величиною в даному представленні є їх числові значення, а не результат взаємодії у схемі. Важливо лише уникати режимів холостого ходу чи короткого замикання джерел напруг, що типово призводить до помилки SPICE синтаксису. При потребі в модель додають інші функціональні компоненти, зокрема, для опису коефіцієнтів планарного ефекту та асиметрії PXC.

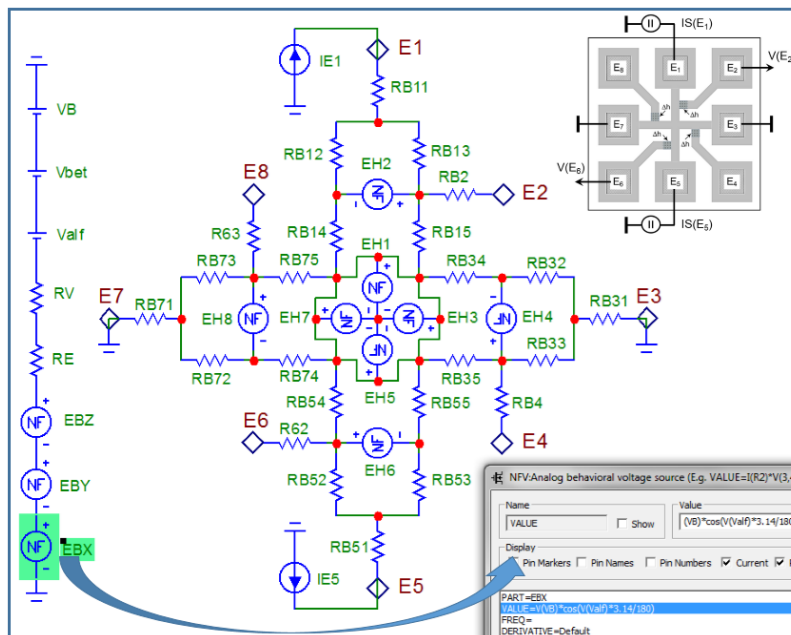


Рис. 6. Схема заміщення SPICE моделі.

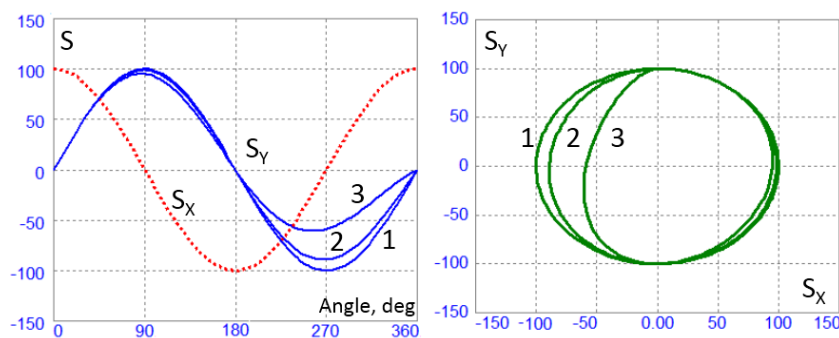


Рис. 7. Приклад результатів модельних досліджень.

Далі, використовуючи отримані числові значення функціональних компонентів синтезуємо схему заміщення структури РХС. Для цього використовуємо вищезгадані керовані резистивні компоненти $R_{V^{**}}$ та джерела напруги $E_{H^{**}}$ (де $**$ - номер компоненту). На завершальному етапі до синтезованої схеми під'єднуємо кола живлення, зокрема джерела струму I_{E1} , I_{E5} .

Приклад результатів модельних досліджень, зокрема нормованих сигналів S_X та S_Y , що презентують залежності різниці вихідних напруг між виводами E2, E6 (сигнал S_X) та E4, E8 (сигнал S_Y) від кута повороту (Angle, deg) структури в магнітному полі, представлено на рис. 7 (зліва). Моделювання проводилося для трьох значень (1, 2, 3) асиметрії структури, яка відображалася певними неузгодженнями в коефіцієнтах модуляції параметрів компонентів моделі. Візуалізація оцінки такої асиметрії наведено на рис. 7 (справа), де представлені нормовані залежності $S_Y = f_{XY}(S_X)$. Враховуючи, що при ідеальній симетрії структури повинна виконуватися умова $S_X^2 + S_Y^2 = const$, асиметрію можна оцінити за деформацією (2, 3) функції f_{XY} відносно ідеального кола (1).

Параметри даної SPICE моделі коректуються у відповідності до результатів експериментальних досліджень, а результати моделювання використовують для розробки та оптимізації методик калібрування РХС.

IV. Апробація

Дослідні зразки представлених в даній роботі 3-D сенсорів магнітного поля виготовлялися за традиційною технологією тонкоплівкових структур на пластинах напівізолюючого Gallium Arsenide (GaAs). Товщина активного Indium Antimonide (InSb) становить 10 мкм, концентрація легуючої домішки - $N = 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Структура сенсора виготовлялася селективним травленням активного шару в відповідності до вищеописаної конструкції. Контактні площадки сформовані з використанням золота (Au). Розмір чіпів - $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$. Чутливість дослідних зразків становить приблизно $0.3 \text{ V}/(\text{A} \cdot \text{T})$ для осей V_X , V_Y та $2 \text{ V}/(\text{A} \cdot \text{T})$ для осі V_Z . Перехресна

чутливість не перевищує 10 %.

Апробація 3-D сенсорів магнітного поля здійснена в апаратно-програмному комплексі вимірювання вектора магнітного поля, дослідний зразок якого представлено на рис. 8. Вбудована система 3-D сенсора реалізована на основі microprocessor noise-immune signal transducer for galvanomagnetic smart sensor devices [29]. Реалізація цього перетворювача здійснена з використанням програмованої системи на кристалі PSoC сімейства 5LP Family Cypress Semiconductor Corporation [30].

Висновки

Представлено нове рішення 3-D сенсора магнітного поля на основі РХС, комбінуючи проходження струму в яких, вимірюють напруги для подальшого визначення трьох проєкцій вектора індукції магнітного поля - V_X , V_Y , V_Z . У структуру запропонованого 3-D сенсора входять один нормальний перетворювач Холла, вісь чутливості якого (Z-вісь) збігається з нормаллю до площини напівпровідникового шару, та дві вертикальні РХС, осі чутливості яких (X-вісь та Y-вісь) є паралельними до площини напівпровідникового шару. На відміну від відомих рішень, потенційні (холлівські) виводи вертикальних РХС формуються не на поверхні напівпровідникового шару, а в перехідній області між шаром напівпровідника та діелектричною підкладкою. Це дозволяє виготовити такі сенсори за традиційною технологією тонкоплівкових структур.

Розроблена SPICE модель 3-D сенсора магнітного поля на основі РХС. В модель входять керовані джерела напруги для моделювання холлівських напруг та керовані резистивні компоненти для моделювання магніторезистивної модуляції омичних ділянок структури. Функціональні взаємозв'язки між параметрами холлівських сенсорів та проєкціями вектора індукції магнітного поля реалізуються формальними аналогами і описуються з використанням тригонометричних функціональних залежностей, зокрема, залежностей холлівських та омичних складових сигналу від кута нахилу сенсора в магнітному полі.

Дослідні зразки представлених в даній роботі 3-D сенсорів магнітного поля виготовлялися з

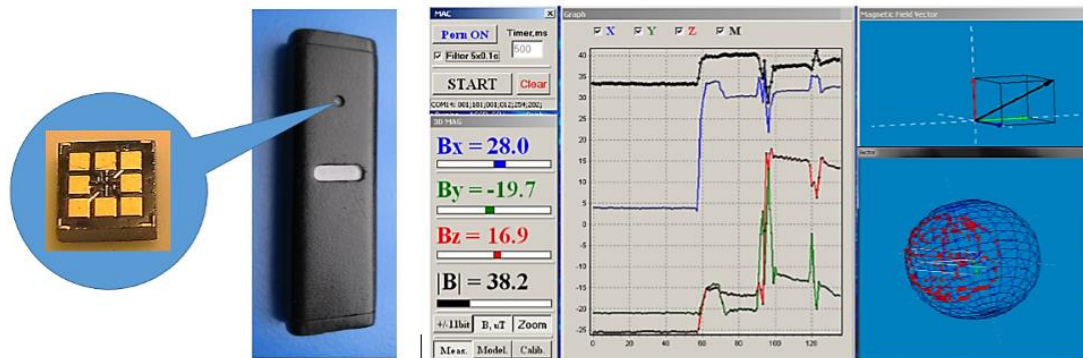


Рис. 8. Апробація 3-D сенсорів магнітного поля.

використанням структур InSb на пластинах напівізольюючого GaAs. Розмір чіпів – 1 mm × 1 mm. Чутливість дослідних зразків становить приблизно 0.3 V/(A · T) для осей V_x , V_y та 2 V/(A · T) для осі V_z . Апробація 3-D сенсорів здійснена в апаратно-програмному комплексі вимірювання вектора магнітного поля з використанням програмованої системи на кристалі PSoC сімейства 5LP Family Cypress Semiconductor Corporation.

Барило Г.І. - професор, д.т.н., доцент кафедри електронних пристроїв;
Голяка Р.Л. - професор, д.т.н., професор кафедри електроніки та інформаційних технологій;
Марусenkova Т.А. - к.т.н., доцент, доцент кафедри програмного забезпечення;
Івах М.С. – к.т.н., старший викладач кафедри електронних пристроїв.

- [1] N. Hadjigeorgiou, K. Asimakopoulos, K. Papafotis, P.P. Sotiriadis, *Sensors Journal* (2020); <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3045660>.
- [2] E. Quandt, S. Stein, M. Wuttig, *International Magnetism Conference (INTERMAG) (IEEE, Nagoya, 2005)*. P. 967; <https://doi.org/10.1109/INTMAG.2005.1463912>.
- [3] X. Zhao, Y. Bai, Q. Deng, C. Ai, X. Yang, D. Wen, *Sensors Journal* 17(18), 5849 (2017); <https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2736639>.
- [4] H. Pan, L. Yao, S. He, W. Li, L. Li, J. Sha, *Third International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control (IEEE, Shenyang, 2013)*, P. 252; <https://doi.org/10.1109/IMCCC.2013.60>.
- [5] S.V. Lozanova, A.J. Ivanov, C.S. Roumenin, *XXVIII International Scientific Conference Electronics (IEEE, Sozopol, 2019)*. P. 1; <https://doi.org/10.1109/ET.2019.8878505>.
- [6] C. Leepattarapongpan, T. Phetchakul, N. Penpondee, P. Pengpad, A. Srihapat, E. Chaowicharat, C. Hruanun, A. Poyai, *SENSORS (IEEE, Limerick, 2011)*; <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2011.6127079>.
- [7] P. Beran, M. Klöhn, H. Hohe, *Magnetics Letters* 10, 1 (2019); <https://doi.org/10.1109/LMAG.2019.2944581>.
- [8] V.S. Luong, S. Yu-Hsin, L. Chih-Cheng, J. Jen-Tzong, H. Jen-Hwa, L. Ming-Han, W. Jong-Ching, L. Meng-Huang, C. Ching-Ray, *Transactions on Nanotechnology* 17(1), 11 (2018); <https://doi.org/10.1109/TNANO.2017.2660062>.
- [9] C. Guo, H. Zhang, H. Guo, L. Chen, W. Chen, N. Yu, *Sensors Journal* 21(3), 3121 (2021); <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3028149>.
- [10] P. Beran, M. Stahl-Offergeld, V. Peters, D. Krause, H. Hohe, *Transactions on Magnetism* 55(1), 1 (2019); <https://doi.org/10.1109/TMAG.2018.2873238>.
- [11] O. Boyko, R. Holyaka, Z. Hotra, *14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET) (IEEE, Slavske, 2018)*. P. 697; <https://doi.org/10.1109/TCSET.2018.8336296>.
- [12] A. Dwivedi, A. Ramakrishnan, A. Reddy, K. Patel, S. Ozel, C. D. Onal, *Sensors Journal* 18(9), 3852 (2018); <https://doi.org/10.1109/JSEN.2018.2814839>.
- [13] D. Ettelt, P. Rey, G. Jourdan, A. Walther, P. Robert, J. Delamare, *Journal of Microelectromechanical Systems* 23(2), 324 (2014); <https://doi.org/10.1109/JMEMS.2013.2273362>.
- [14] M. Ortner, C. Huber, N. Vollert, J. Pilz, D. Süß, *Sensors (IEEE, Glasgow, 2017)*. P. 1 <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2017.8233930>.
- [15] D. Fedasyuk, R. Holyaka, T. Marusenkova, *15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), (IEEE, Lviv-Slavske, 2020)*. P. 46; <https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235387>.
- [16] R. Holyaka, I. Prudyus, G. Barylo, T. Marusenkova, S. Fabirovskyy, *International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo) (IEEE, Odessa, 2019)*. P. 1 <https://doi.org/10.1109/UkrMiCo47782.2019.9165386>.
- [17] I. Kogut, A. Druzhinin, V. Holota, *Advanced Materials Research* 276, 137 (2011); <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.276.137>.
- [18] I. Kogut, V. Holota, A. Druzhinin, V. Dovhij, *Journal of Nano Research* 39, 228 (2016); <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JNanoR.39.228>.
- [19] S. Nazari Nejad, R. Mansour, *Transactions on Magnetism* 52(1), 1 (2016); <https://doi.org/10.1109/TMAG.2015.2476489>.
- [20] P. Meier, K. Rohrmann, M. Sandner, M. Prochaska, *62nd International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS) (IEEE, Dallas, 2019)*. P. 1005; <https://doi.org/10.1109/MWSCAS.2019.8885265>.
- [21] Z. Hotra, R. Holyaka, I. Bolshakova, I. Yurchak, T. Marusenkova, *Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (IEEE, Polyana, 2011)*. P. 5.
- [22] Z. Hotra, R. Holyaka, I. Bolshakova, I. Yurchak, T. Marusenkova, *11th International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM) (IEEE, Polyana, 2011)*. P. 413.
- [23] R. Berdan, C. Lim, A. Khiat, C. Papavassiliou, T. Prodromakis, *IEEE Electron Device Letter* 35, 1 (2014); <https://doi.org/10.1109/LED.2013.2291158>.

- [24] A. Aziz, S. Ghosh, S. Datta, S.K. Gupta, *Electron Device Letters* 37(6), 805 (2016); <https://doi.org/10.1109/LED.2016.2558149>.
- [25] Y. Moumouni, R. Jacob Baker, 58th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS) (IEEE, Fort Collins, 2015). P. 1; <https://doi.org/10.1109/MWSCAS.2015.7282015>.
- [26] M. Crescentini, A. Romani, E. Sangiorgi, 15th International Conference on Ultimate Integration on Silicon (ULIS) (IEEE, Stockholm, 2014). P. 89; <https://doi.org/10.1109/ULIS.2014.6813923>.
- [27] A. Rossini, F. Borghetti, P. Malcovati, F. Maloberti, 12th International Conference on Electronics, Circuits and Systems (IEEE, Garmarh, 2005). P. 1; <https://doi.org/10.1109/ICECS.2005.4633482>.
- [28] G. Sung, W. Wang, C. Yu, *Sensors Journal* 17(21), 6880 (2017); <https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2754295>.
- [29] R. Holyaka, I. Yurchak, T. Marusenkova, V. Ilkanych, International Conference on Modern Problem of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (IEEE, Lviv, 2012). P. 430.
- [30] H. Barylo, O. Boyko, I. Helzhynskyy, R. Holyaka, T. Marusenkova, M. Ivakh, 16th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM) (IEEE, Lviv, 2021). P. 58; <https://doi.org/10.1109/CADSM52681.2021.9385254>.

G.I. Barylo, R.L. Holyaka, T.A. Marusenkova, M.S. Ivakh

Structure and 3-D Model of a Solid State Thin-Film Magnetic Sensor

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine, roman.l.holiaka@lpnu.ua

Vector 3-D magnetic sensors form the basis of measurement devices for magnetic field mapping and magnetic tracking. Typically, such sensors utilize specific constructions based on split Hall structures (SHS). An SHS-based 3-D magnetic sensor is a bulk semiconductor integrated structure with 8 or more contacts. Combining current flow directions through the contacts and measuring the corresponding voltages, one defines projections B_x , B_y , B_z of the magnetic field vector. This work presents a novel design of 3-D solid state magnetic sensors that requires no insulation by p-n junctions and can be implemented by thin-film technology traditionally used for fabrication of Hall sensors including those based on InSb films. Besides, a SPICE model of the 3-D magnetic sensor is provided, which helps design the proposed sensor and refine techniques of its calibration.

Keywords: 3-D magnetic sensor, split Hall structures, SPICE model.