

Сигнальний перетворювач функціонально інтегрованих термомагнітних сенсорів

Барило Г. І.¹, Бойко О. В.², Голяка Р. Л.¹, Марусенкова Т. А.¹, Прудіус І. Н.¹, Фабіровський С. Є.¹

¹Національний університет “Львівська політехніка”

²Львівський національний медичний університет імені Данила Галицького

E-mail: fabirovskii@gmail.com

Стаття присвячена проблемам розвитку сенсорної електроніки у відповідності до концепцій “Лабораторія на чіпі” (Lab-on-Chip), “Програмована система на кристалі” (Programmable System-on-Chip) та “Інтернет речей” (Internet of Things). Вирішується задача функціонального інтегрування, основою якої є поєднання в одному пристрої декількох взаємодоповнюючих методів вимірювання. Новизною отриманих результатів є реалізація сенсорного пристрою термомагнітного аналізу на однокомпонентній структурі латерального магнітотранзистора. Показано, що перевагою побудови in-situ сенсорів термомагнітного аналізу на основі магнітотранзисторів є мультипараметричність їх режимів роботи. Ця перевага створює можливості реалізації термомагнітних однокомпонентних вимірювальних перетворювачів з розширеними функціональними можливостями, а саме, вимірювання магнітного поля, керованого нагріву та вимірювання температури. Керування процесами вимірювання з функціональним in-situ інтегруванням здійснюється сигнальним перетворювачем, який містить аналоговий фронт-енд та мікроконтролер керування. На відміну від типових рішень сигнального перетворення на магнітотранзисторах, запропонована схема дозволяє перейти від двофазного типу вихідного сигналу магнітотранзистора у виді різницевої напруги до ефективнішого для вирішуваної задачі рішення з однофазним вихідним сигналом. Таке рішення особливо важливе в схемах з низьковольтним однополярним живленням, що є вимогою до пристроїв Інтернету речей. Сигнальний перетворювач реалізовано на платформі програмованої системи на кристалі PSoC CY8CKIT-059 PSoC 5LP Prototyping Kit. Інформативна величина температури визначається температурною залежністю падіння напруги на прямозміщених r-p переходах магнітотранзистора. Представлені результати апаратно-програмної реалізації сигнального перетворювача. Галузь застосування представленого вимірювального перетворювача – сенсорні пристрої термомагнітного аналізу для матеріалознавства, біофізики та медицини.

Ключові слова: мікроелектронний сенсор; сигнальний перетворювач; біомедична інженерія; функціональне інтегрування

DOI: [10.20535/RADAP.2019.76.63-71](https://doi.org/10.20535/RADAP.2019.76.63-71)

Вступ та постановка задачі

Новою тенденцією розвитку сучасної сенсоріки є функціональне інтегрування, основою якого є поєднання в одному пристрої декількох взаємодоповнюючих методів вимірювання. Прикладом такого функціонального інтегрування є метод та пристрої медичної терапії злоякісних новоутворень на основі керованої гіпертермії [1]. В цьому методі використовують магнітні, здебільшого — феритові, наночастинки (Magnetic nanobeads — нанобусинки), які транспортують магнітним полем в зону пухлини, а далі розігрівають цю зону електромагнітним полем певної частоти. Принципово важливою ознакою такого методу є те, що при певній температурі (в точці Кюрі) наночастинки втрачають свої феромагнітні властивості, а відтак, перестають нагріватися. Відбувається стабілізація температури — при зниженні останньої має місце повторне нама-

гнічення наночастинок на їх нагрів. Така термічна терапія магнітними наночастинками пригнічує діяльність ракових клітин, а при певній експозиції спостерігається загибель ракових клітин.

Використання вищезгаданих магнітних наночастинок, а відтак і методи досліджень властивостей синтезованих на їх основі біокомплексів, поширюється і на інші задачі. Це — цільова доставка зв'язаних з магнітними наночастинками ліків та контрастуючих агентів при магнітній резонансній томографії, біомагнітна сепарація клітин та бактерій, виділення та очищення білків, нуклеїнових кислот, полінуклеотидів, тощо [2, 3].

Очевидно, що подальший прогрес в цій галузі біомедичної інженерії обумовлюється вирішенням проблем розвитку функціонально інтегрованих методів магнітного та термічного аналізу, а відтак, і відповідних сенсорних пристроїв. Базовими вимогами до сучасних сенсорів є відповідність їх сигналь-

них перетворювачів вимогам апаратно-програмної реалізації на концепції Систем на кристалі (System on Chip, SoC) [4]. Такі сенсорні сигнальні перетворювачі, сучасним варіантом назви яких є сенсорний фронт-енд (Sensor Front-End), повинні забезпечувати функціонування при низьких напругах живлення, мінімальне енергоспоживання, універсальність, стабільність функціонування при зміні зовнішніх факторів, rail-to-rail режими роботи тощо [5]. Крім того, в світлі сучасних тенденцій розвитку інфокомунікаційних систем, нове покоління сенсорних пристроїв має відповідати концепціям Лабораторії на чіпі (Lab-on-Chip) [6] та Інтернету Речей (IoT, Internet of Things) [7].

В даній роботі вирішується задача побудови мікроелектронного сигнального перетворювача на основі функціонального інтегрування магнітних та термічних методів досліджень, що забезпечує можливість реалізації нового покоління термомагнітних сенсорів Інтернету речей в галузях матеріалознавства та біомедичної інженерії.

1 Базові підходи функціонального інтегрування

У відповідності до сформульованої задачі в статті представлений подальший розвиток концепції побудови функціонально інтегрованих in-situ сенсорів на основі компонентів мікроелектроніки. Під функціональним інтегруванням розуміється можливість використання однієї і тієї ж мікроелектронної структури для:

- керованого нагріву досліджуваного зразку у відповідності до заданого алгоритму модуляції теплового потоку;
- вимірювання температури досліджуваного зразка чи різниці температур між досліджуваним та опорним зразками;
- вимірювання зміни характеристик досліджуваного зразка під дією зовнішнього впливу (здебільшого, такий вплив реалізується компонентом сенсорного пристрою, що називають актюатором), зокрема, магнітних властивостей досліджуваного зразка в процесі модуляції магнітного поля та температури.

Термін «in-situ» — латинський вираз, що означає «на місці», використано за аналогією до вимірювання параметрів безпосередньо в об'єкті дослідження чи калібрування сенсора без його виймання з об'єкту вимірювання. В даному разі під терміном «in-situ» будемо розуміти здатність вимірювального перетворювача формувати кероване нагрівання та вимірювання температури без використання традиційних нагрівників та сенсорів температури.

Керування процесами вимірювання з функціональним інтегруванням здійснюється сигнальним перетворювачем, який містить аналоговий фронт-енд (Analog Front-End) та мікроконтролер керування. Цей сигнальний перетворювач є невід'ємним компонентом вимірювального перетворювача, адже алгоритм керування процесом вимірювання є набагато складнішим, ніж це має місце в традиційних монофункціональних сенсорах. В даному контексті під складністю розуміють, власне, не інтегрування різних сенсорів в єдиний модуль, а реалізацію функціонально інтегрованого вимірювального перетворення.

Приклад реалізації функціонально інтегрованих сенсорів магнітного поля та температури представлений на рис. 1. Такі сенсори складаються з двох компонентів – напівпровідникового сенсора Холла (1), яким вимірюють абсолютні значення магнітного поля та мініатюрного (з розміром декілька міліметрів) соленоїда – актюатора (2), яким формують магнітні поля заданої величини, проводять керований нагрів структури та вимірювання температури. Напівпровідниковий чіп сенсора Холла розміщено в соленоїді, внутрішній діаметр котушки якого становить приблизно 1 мм. Соленоїд виготовлено з мідного дроту. В залежності від конкретних вимог кількість витків соленоїда становить від декількох десятків до декількох сотень.

Наведені в даній статті інтегральні структури та модулі сенсорів виготовлені, частково, в рамках проектів Українського науково-технологічного центру STCU No 3535 та STCU No 3988 [8]. На ці структури та відповідні методи вимірювання отримані міжнародні та національні патенти України, Франції, Великобританії, зокрема [9].

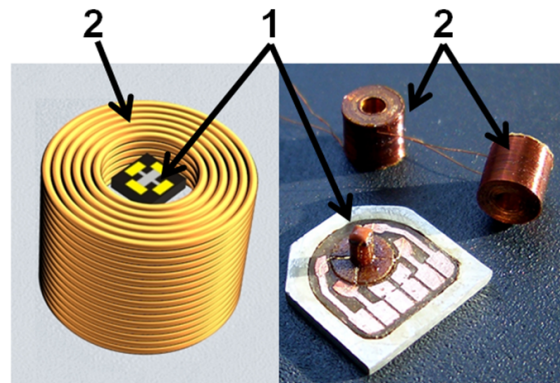


Рис. 1. Компоненти функціонально інтегрованого модуля

Застосування функціонально інтегрованого модуля на основі розміщеного в соленоїді сенсора Холла охоплює два класи задач. Першим класом є вище згадані сенсори термомагнітного аналізу в галузях матеріалознавства, біофізики та медицини. В цьому разі соленоїд використовують для формування заданих значень магнітного поля, керованого нагріву досліджуваної речовини та вимірювання

її температури. Другим класом є сенсори магнітної діагностики реакторів термоядерного синтезу. Їх особливістю є експлуатація сенсорів в жорстких радіаційних умовах. В таких умовах має місце нестабільність параметрів (паразитний дрейф чутливості) напівпровідникових сенсорів Холла. Проблему вирішують періодичним *in-situ* калібруванням цих сенсорів безпосередньо в місці їх застосування. Для цього з допомогою соленоїда формують тестові магнітні поля відомої величини та вимірюють відповідні зміни сигналів сенсорів Холла. За значенням цих змін визначають реальну чутливість сенсорного пристрою.

Певним недоліком розглянутого інтегрованого модуля є функціональна обмеженість сенсорів Холла. Останні характеризуються лише одним інформативним сигналом — холлівською напругою, а на її основі не представляється можливим забезпечувати функції керованого нагріву та вимірювання температури. І хоча вихідна напруга сенсорів Холла є функцією не лише магнітного поля, але і температури, все ж є неможливим виділити у вихідному сигналі корисні складові магнітного поля та температури. Відтак, у вище розглянутому функціонально інтегрованому модулі вимірювання температури проводять терморезистивним методом, використовуючи температурну залежність опору мідного дроту, з якого виготовлений соленоїд.

Представлені в подальших розділах статті матеріали є подальшим розвитком концепції функціонального інтегрування. Новизною отриманих результатів є реалізація сенсорного пристрою термомагнітного аналізу речовин на розщеплених холлівських структурах, зокрема, структурах латеральних магнітотранзисторів з розщепленим колектором [10]. На відміну від сенсорів Холла розщеплені холлівські структури характеризуються більш розвиненою топологією та збільшеною кількістю виводів, що забезпечує відповідну структурно-функціональну надлишковість. Такий підхід вирішує ряд проблем, зокрема, реалізацію кутових сенсорів (рис. 2 а), в яких активна (чутлива) зона формується на вістрі напівпровідникового чіпу, та трикомпонентних 3D сенсорів магнітного поля (рис. 2 б), в яких забезпечується селективність інформативних сигналів від трьох ортогональних проєкцій магнітного поля [11].

Для реалізації поставленої в даній статті мети були використані інтегральні структури латеральних магнітотранзисторів з розщепленим колектором (рис. 3). Як буде показано далі, використання таких транзисторних структур та відповідного сигнального (вторинного) перетворювача вирішує проблему поєднання в єдиній інтегральній структурі трьох функцій — вимірювання магнітного поля, керованого нагріву та вимірювання температури. В свою чергу, запропоноване рішення забезпечує подальшу мініатюризацію сенсорів та можливість

проводити вище згадані *in-situ* вимірювання однокомпонентним функціонально інтегрованим вимірювальним перетворювачем.

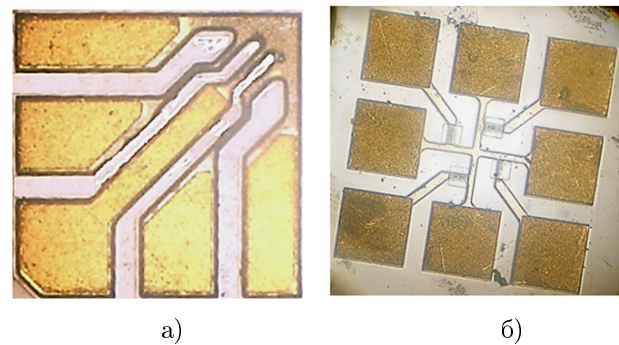


Рис. 2. Фотографія розщеплених холлівських структур: кутовий сенсор (а) та 3D сенсор (б)

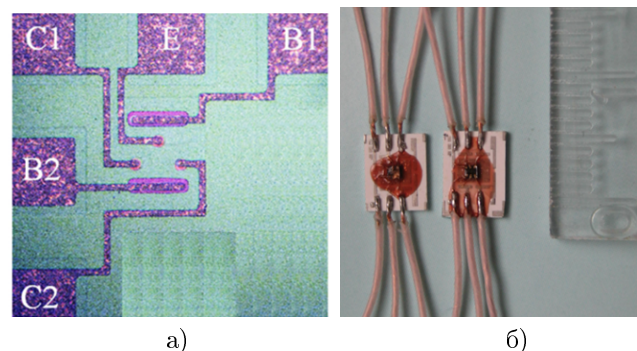


Рис. 3. Фотографія магнітотранзистора (а) та зонди на його основі (б)

2 Функціонально інтегрований магнітотранзисторний перетворювач

Функціонування магнітотранзисторів [12], як первинних вимірювальних перетворювачів магнітного поля, визначає наступні основні механізми руху носіїв:

- ефект Холла — виникнення холлівського електричного поля на основні носії в області бази магнітотранзистора;
- ефект відхилення носіїв на неосновні носії в базовій області в збідненому шарі переходу база-колектор та в слабологованій області колектора;
- магнітоконцентраційний ефект, який є результатом дії сили Лоренца на носії обох типів та виражається в зміні розподілу концентрації носіїв заряду.

Основними перевагами магнітотранзисторів є:

- високі значення співвідношення сигнал-шум, а відтак, висока роздільна здатність вимірювання магнітного поля;
- підвищена стійкість до магнітоіндукційних завад;
- багатопараметричність режимів роботи.

Саме ця третя перевага є визначальною для вирішення поставленої в даній роботі задачі реалізації однокомпонентного (одночіпового) функціонально інтегрованого вимірювального перетворювача. На противагу до звичайних холлівських сенсорів, в яких керування режимами роботи є обмеженим єдиним параметром, а саме струмом живлення, режими роботи магнітотранзистора залежать від багатьох чинників струму емітера, зміщення р-п переходів, значення та знаку дрейфового поля в базовій області тощо. Відтак, це створює можливості реалізації термомагнітних вимірювальних перетворювачів з поєднанням функцій вимірювання магнітного поля, керованого in-situ нагрівання та вимірювання температури.

Структура та спрощена схема формування сигналу сенсора магнітного поля на основі латерального магнітотранзистора з розщепленим колектором представлені на рис. 4. Прийнято умовні позначення: МТ — магнітотранзистор, Е — електрод емітера; В1, В2 — базові електроди; С1, С2 — колекторні електроди; R_{B1} , R_{B2} — резистори базового (вхідного) кола; R_{C1} , R_{C2} — резистори колекторного (вихідного) кола; V_E — джерело живлення.

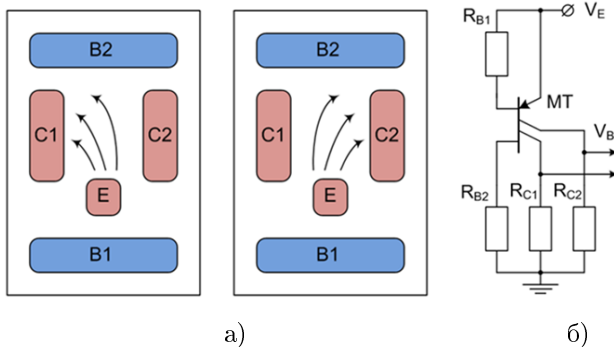


Рис. 4. Структура (а) та спрощена схема формування сигналу (б) сенсора на основі структури магнітотранзистора

Області латерального магнітотранзистора сформовані в шарі n-типу провідності, який вирощений епітаксійним методом на підкладці р-типу провідності. Саме в епітаксійному n-шарі відбувається дрейф та відхилення в магнітному полі носіїв заряду. Такі магнітотранзисторні структури використовуються для вимірювання нормальної до поверхні кристалу проекції магнітного поля B_X . При $B_X > 0$ струм першого колектора С1 збільшується, а другого С2 — зменшується. Натомість, при $B_X < 0$ має місце протилежний перерозподіл струмів — струм колектора

С1 зменшується, а С2 — збільшується. Для формування вихідного сигналу, а саме вихідної різницевої напруги V_B в кола колекторів магнітотранзисторів МТ вмикають резистори навантаження R_{C1} , R_{C2} . Підвищення чутливості до магнітного поля забезпечується формуванням в базовому колі магнітотранзистора прискорюючого магнітного поля. Для цього в структурі формують два базові електроди В1, В2, які з'єднують з відповідними резисторами R_{B1} , R_{B2} .

3 Принцип функціонування та схема сигнального перетворювача

У відповідності до сформульованої задачі функціонального інтегрування в даній роботі був розроблений вимірювальний перетворювач, що забезпечує три функціональні властивості. Ці властивості реалізуються відповідними трьома режимами роботи. Перша функціональна властивість є традиційною для сенсорів магнітного поля — формування інформативного сигналу індукції B_X вимірюваного поля. Друга властивість — контрольований нагрів структури магнітотранзистора з визначенням кількості теплової енергії, що виділяється в структурі під час нагріву. І третя властивість — вимірювання температури структури магнітотранзистора, а відтак, розміщеної на цій структурі досліджуваної речовини.

В доповнення до вище розглянутої спрощеної схеми формування сигналу сенсора магнітного поля на основі структури магнітотранзистора (рис. 4б) пропонуються інші схемні рішення, в яких реалізується керований нагрів та вимірювання температури. Такі схемні рішення базуються на використанні прямо зміщених емітерного (рис. 5) та колекторних (рис. 6) р-п переходів. В цих режимах використовують кероване джерело $I_{Q\&T}$, струм якого модулюється в залежності від параметрів нагріву структури магнітотранзистора та вимірювання її температури. Інформативною величиною температури є напруга V_T , яка в першому наближенні визначається температурною залежністю падіння напруги на прямо зміщених р-п переходах магнітотранзистора. При цьому, джерело $I_{Q\&T}$ може керувати не лише емітерним чи колекторними колами (як це показано на рис. 5 та рис. 6), але і базовим колом. В такому разі емітерні та колекторні електроди комутуються безпосередньо до кола живлення V_E , а керування здійснюється модуляцією струму базового кола магнітотранзистора.

Спрощена схема аналогового фронт-енду розробленого сигнального перетворювача наведена на рис. 7. Крім, власне, магнітотранзистора МТ (води 1 та 2 відповідають базовим електродам, 3 — емітерному електроду, а 4 та 5 — колекторним еле-

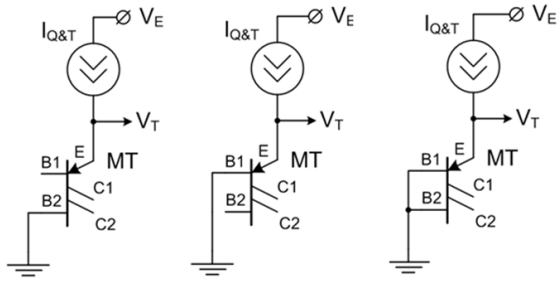


Рис. 5. Варіанти режимів керованого нагріву та вимірювання температури на основі емітерного переходу магнітотранзистора

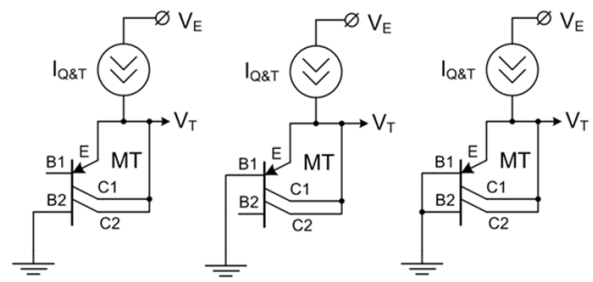


Рис. 6. Варіанти режимів керованого нагріву та вимірювання температури на основі емітерного та колекторних переходів магнітотранзистора

ктродам), схема містить кероване джерело напруги E_C , три операційні підсилювачі OA_1, OA_2, OA_3 , двопозиційні аналогові комутатори S_1, S_2, S_3, S_4 , транзистор T_1 та резистори R_1-R_8 . Живлення схеми здійснюється від однополярного джерела напругою V_E . Вихідні напруги схеми V_B, V_T після аналогоцифрового перетворення АЦП (на схемі вузол АЦП не показано) використовуються в подальшому цифровому перетворенні в інформативні сигнали термомагнітних сенсорів.

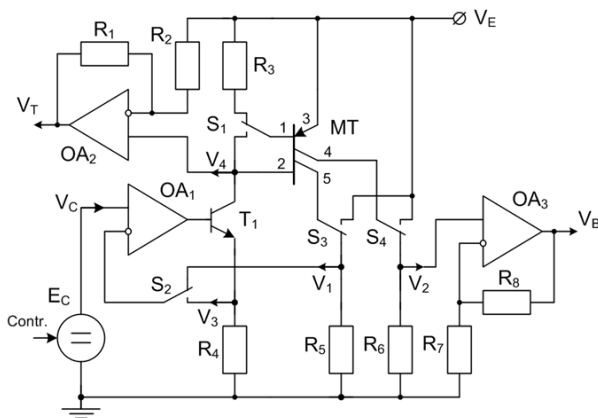


Рис. 7. Спрощена схема аналогового фронт-енду вимірювального перетворювача на структурі магнітотранзистора

В першому режимі роботи вимірювального перетворювача через магнітотранзистор стабілізується струм I_M , значення якого оптимізоване з точки зору заданих характеристик вимірювання магнітного поля індукцією B . Всі ключі $S_1 - S_4$ знаходяться в початковій позиції, що відповідає наведеній схемі. Зокрема, ключ S_1 замикає базу 1 магнітотранзистора до резистора R_3 , ключ S_2 — інверсний вхід операційного підсилювача OA_1 — до резистора R_5 , ключі S_3 та S_4 — колектори 4 та 5 магнітотранзистора MT до резисторів R_5, R_6 , відповідно. Резистор R_3 є необов'язковим — його функція полягає у формуванні прискорюючого електричного поля в базовій області магнітотранзистора, що забезпечує підвищення коефіцієнту чутливості до магнітного поля.

На відміну від типових рішень сигнального перетворення на магнітотранзисторах (рис. 4б), запропонована схема дозволяє перейти від двофазного типу вихідного сигналу магнітотранзистора у вигляді різничевої напруги до ефективнішого для вирішуваної задачі рішення з однофазним вихідним сигналом. Таке рішення особливо важливе в пристроях з низьковольтним однополярним живленням, що є вимогою до сучасних сенсорних пристроїв, зокрема Інтернету Речей. Відтак, в даній схемі стабілізується не базовий, емітерний чи сумарний колекторний струми магнітотранзистора, а лише струм одного з колекторів (в даному випадку — струм колекторного виводу 5). Вказаний колектор формує опорне коло, а обумовлене струмом цього колектора падіння напруги на резисторі R_5 використовується в якості опорної напруги V_1 . Натомість другий колектор (вивід 4) формує коло інформативного сигналу з напругою V_2 .

Значення струму колектора опорного кола магнітотранзистора задається напругою V_C керованого джерела E_C . Контур стабілізації струму від джерела E_C замикається через коло зворотного зв'язку: неінвертуючий вхід операційного підсилювача OA_1 , транзистор T_1 , база (вивід 2) та колектор (вивід 5) магнітотранзистора MT , резистор R_5 , ключ S_2 , інвертуючий вхід OA_1 . Таким чином, баланс цього кола зворотного зв'язку, забезпечуючи рівність $V_1 = V_C$, стабілізує струм колектора опорного кола на рівні $I_M = V_1/R_5 = V_C/R_5$. Значення цього струму не перевищує 1 мА.

Під дією вимірюваного магнітного поля індукцією B_X відбувається перерозподіл струмів ΔI_C між колекторами магнітотранзистора — збільшується струм одного з них та зменшується струм іншого. При зміні напрямку вектора індукції перерозподіл відбувається з протилежним знаком. Враховуючи вищезгадану стабілізацію струму колектора опорного кола інформативним сигналом вимірюваного магнітного поля є напруга, що формується на резисторі R_6 , а саме, $V_2 = \Delta I_C R_6$. Синфазна складова цього сигналу рівна напрузі опорного кола V_1 , тобто, при відсутності магнітного поля та ідеалізовано

симетричній структурі магнітотранзистора (з відсутністю напруги зміщення) має місце рівність $V_2 = V_1$. Далі ця напруга підсилюється операційним підсилювачем OA_2 з коефіцієнтом $K_V = 1 + R_8/R_7$. Відтак, результуюче значення вихідної напруги сенсора магнітного поля становить

$$V_B = \Delta I_C R_6 (1 + R_8/R_7).$$

Другий режим роботи вимірювального перетворювача забезпечує контрольований нагрів структури магнітотранзистора з визначенням кількості виділеної в структурі теплової енергії. Нагрів здійснюється короткими імпульсами суттєво збільшеного через структуру магнітотранзистора струму I_Q (в 10...100 разів). Необхідно відзначити, що реалізація цього режиму шляхом прямого збільшення струму є неможливою. Це обумовлено низькими коефіцієнтами передачі струму транзисторної структури та доволі значним опором її базової області. Відтак, задача вирішується перемиканням магнітотранзистора в діодний режим. Для цього його колекторні р-п переходи перемикаються зі зворотного зміщення в пряме.

Реалізація такого перемикання здійснюється комутаторами S_3, S_4 , які приєднують колекторні електроди 4 та 5 (р-типу провідності), які в такому з'єднанні слугують анодом діода, до плюсової напруги — в даному рішенні — до напруги живлення V_E . Крім того, комутатор S_1 взаємно з'єднує обидва базові виводи 1 та 2 (п-типу провідності), а відтак ці виводи слугують катодом діода. Резистор R_3 залишається невід'єднаним. Струм нагріву магнітотранзистора I_Q в такому діодному режимі задається колом на транзисторі T_1 , резисторі R_4 та операційному підсилювачі OA_1 . Для цього комутатор S_2 перемикає інвертуючий вхід OA_1 з резистора R_5 на резистор R_4 . Значення імпульсів струму нагріву, що визначається виразом $I_Q = V_3/R_4 = V_C/R_4$, типово знаходиться в межах від 30 мА до 300 мА і залежить від необхідної динаміки нагріву та теплового опору структури магнітотранзистора.

В процесі вимірювального перетворення значення амплітуди імпульсів струму нагріву I_Q та тривалості t_Q цих імпульсів використовуються для розрахунку виділеної в структурі магнітотранзистора енергії нагріву $Q_P = I_Q V_D t_Q$, де V_D — падіння напруги на структурі в режимі нагріву. Ця напруга визначається як різниця між напругою живлення, до якої під'єднано анод — взаємно з'єднаних емітерних та колекторних областях магнітотранзистора, та напругою V_4 , яка формується на його базових електродах. Для підвищення точності вимірювання вказаної різниці напруга V_4 попередньо підсилюється на OA_2 з резисторами R_1, R_2 кола зворотного зв'язку:

$$V_T = V_4 (1 + R_1/R_2).$$

В даному разі необхідності в значному коефіцієнті підсилення немає. Тут мова йде, переважно,

про необхідність відв'язати силове коло нагріву від входу аналого-цифрового перетворювача.

Третій режим роботи вимірювального перетворювача забезпечує формування інформативного сигналу про температуру магнітотранзистора. Температура визначається за наперед відомою (отриманою в ході попереднього калібрування) температурною залежністю падіння напруги V_4 на магнітотранзисторі у вищезгаданому діодному режимі. Відтак, нічим принциповим цей режим не відрізняється від режиму нагріву. Відмінністю є лише те, що вимірювання V_4 відбувається не при великих значеннях струму нагріву I_Q , а при значно зменшеному струмі I_T . Значення цього струму, як і в попередньому режимі нагріву, задається напругою V_C .

Необхідність зменшення струму I_T обумовлена впливом опору базової області магнітотранзистора на температурні залежності падіння напруги V_4 . Температурний коефіцієнт напруги на транзисторі в діодному включенні, який, власне, визначає корисний сигнал про температуру, є від'ємним. Натомість, коефіцієнт опору базової області є додатнім. Відтак, при значному падінні напруги на базовій області в режимі нагріву має місце взаємна компенсація цих температурних коефіцієнтів.

Зокрема, на рис. 8 наведені результати експериментальних досліджень температурних залежностей падіння напруги (Voltage, mV) на магнітотранзисторі в діодному включенні при амплітудах імпульсів струму: $I_1 = 0.1$ мА, $I_2 = 3$ мА, $I_3 = 10$ мА, $I_4 = 50$ мА, $I_5 = 100$ мА. В процесі таких досліджень, які, саме, і проводяться з метою калібрування кола вимірювання температури, структура магнітотранзистора нагрівалася до температури (Temperature, °C) 100 °C. Нагрів проводився зовнішнім джерелом тепла (в термостаті).

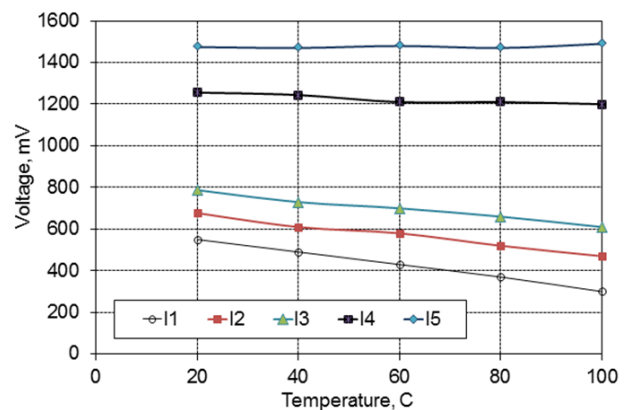


Рис. 8. Температурні залежності падіння напруги на магнітотранзисторі в діодному включенні

Вимірювання напруги проводять в імпульсному режимі при тривалості імпульсів 0.1 мс та щільності 1000. Вибір тривалості імпульсів та щільності обумовлюється вимогою мінімального нагріву структури магнітотранзистора. Таким чином, темпе-

ратура останнього практично співпадає з наперед відомою температурою в термостаті.

Можна бачити, що при значних струмах, зокрема, $I_4 = 50 \text{ mA}$ та $I_5 = 100 \text{ mA}$ — температурний коефіцієнт є дуже незначним (переходить через нульові значення), а відтак, вимірювання температури за падінням напруги є неможливим. З практичної точки зору оптимальні значення струму I_T , при якому виконуються умови мінімального саморозігріву та достатньо високого значення температурного коефіцієнту напруги (орієнтовно $-2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$) можуть знаходитися в діапазоні від 0.1 mA до 1 mA .

4 Апаратно-програмна реалізація сигнального перетворювача

Враховуючи вимоги до сучасної мікроелектроніки, зокрема до сенсорних пристроїв Інтернету Речей, вищезрозглянутий сигнальний перетворювач реалізовано на платформі PSoC (Programmable System-on-Chip) [13]. До структури PSoC входять вузли цифрових та аналогових пристроїв, вузли мікропроцесора, матриці енергозалежної та енергонезалежної пам'яті, системні ресурси, а також вузли програмування та керування енергоспоживанням. Основою цифрових вузлів є матриця універсальних цифрових блоків, спеціалізованих цифрових блоків, зокрема для реалізації інтерфейсів, таймерів, широтно-імпульсних модуляторів тощо. Аналоговими вузлами PSoC є блоки на перемикальних конденсаторах та блоки з неперервним сигнальним перетворенням, зокрема: операційні підсилювачі, компаратори, джерела опорної напруги на принципі забороненої зони, аналогові мультиплексори тощо. Вузли з'єднуються програмно конфігурованою мережею сигнальних ліній. Дещо спрощений варіант виконання схеми сигнального перетворювача на PSoC представлено на рис. 9.

Цифро-аналоговий перетворювач VDAC8_1 виконує функцію керованого джерела напруги E_C . Операційний підсилювач Opamp_1 формує коло стабілізації струму магнітотранзистора. Підсилювачі з програмованим коефіцієнтом підсилення PGA_1 та PGA_2 виконують функції підсилення вихідних напруг V_B та V_T , які є інформативними сигналами індукції магнітного поля та температури. Аналого-цифрове перетворення цих напруг, а також напруг кола живлення (виводи Pin_A16, Pin_A17) здійснюється модулем ADC_SAR_1 (SAR — Successive Approximation Register ADC, перетворювач послідовного наближення). Для комутації кіл у відповідності до алгоритму вимірювання використовують аналогові мультиплексори AMux_S1 - AMux_S5. Зв'язок з комп'ютером здійснюється модулем UART_1.

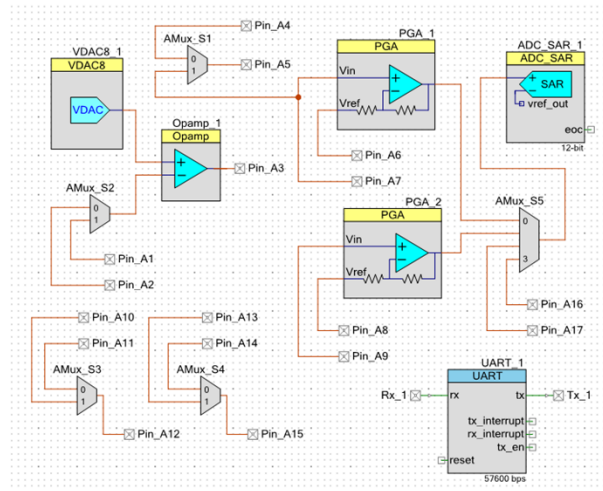


Рис. 9. Реалізація схеми сигнального перетворювача на PSoC

Реалізація сигнального перетворювача здійснена на базі модуля CY8CKIT-059 PSoC 5LP Prototyping Kit [14]. Фотографія плати макету сигнального перетворювача функціонально інтегрованого термомагнітного сенсора наведена на рис. 10, а вікна програмного забезпечення керування процесом вимірювання та візуалізації результатів вимірювання — на рис. 11.

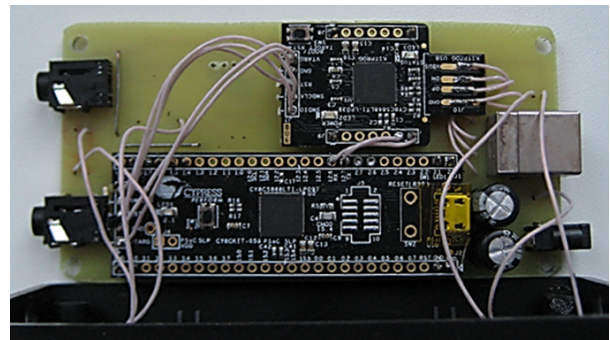


Рис. 10. Плати макету сигнального перетворювача на основі модуля CY8CKIT-059

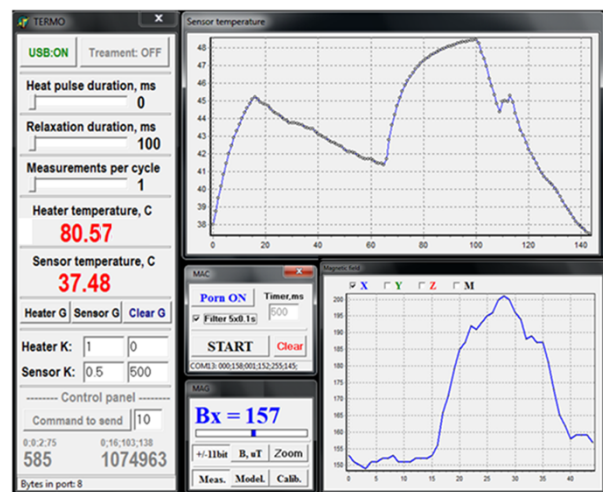


Рис. 11. Вікна програмного забезпечення функціонально інтегрованого термомагнітного сенсора

Керування процесом вимірювання магнітного поля здійснюється в вікнах MAC та MAG, а візуалізація результатів вимірювання — у вікнах Sensor temperature та Magnetic field. Керування процесом нагріву та вимірювання температури здійснюється в вікні TERMO. Передбачена можливість задавати:

- тривалість імпульсів нагріву — Heat pulse duration, ms;
- тривалість теплової релаксації — Relaxation duration, ms;
- кількість вимірювань в кожному термічному циклі — Measurements per cycle;
- коефіцієнти функцій вимірювального перетворення — Heater K, Sensor K;
- API команди керування режимами роботи — Command to send.

Чутливість вимірювання магнітного поля становить 10 мкТ, а температури 0,01 °С. В залежності від варіанту використання сенсорний пристрій може живитися від напруги 5В USB порту персонального комп'ютера чи зовнішнього блоку живлення. Струм споживання становить 20 мА (без нагріву) та 500 мА (з нагрівом). Зв'язок із сигнальним перетворювачем здійснюється через інтерфейс UART, що робить можливим використання пристрою, як з USB портами комп'ютерів, так і модулями радіочастотних сенсорних мереж Інтернету речей, зокрема, ESP-32, HC-05, MRF24J40MA-I/RM, SX1276 в стандартах Bluetooth, Wi-Fi, ZigBee, LoRa тощо.

Апаратно-програмна реалізація сигнального перетворювача характеризується високою універсальністю використання. Так, лише незначні модифікації є необхідними для реалізації функціонально інтегрованого сенсора термомагнітного аналізу на основі не лише магнітотранзистора, але і на вищезгаданих розщеплених холлівських структурах (рис. 2). В такому разі, керований нагрів та вимірювання температури здійснюється з використанням резистивних елементів розщеплених холлівських структур, а мультипараметричність забезпечують відповідними комбінаціями холлівських та магніторезистивних компонентів сигналу. Ці питання будуть винесені в окрему публікацію.

Висновки

Отримала подальший розвиток концепція функціонального інтегрування в in-situ сенсорах термомагнітного аналізу. Новизною отриманих результатів є реалізація сенсорного пристрою на структурах латеральних магнітотранзисторів з розщепленим колектором. Вирішена проблема поєднання

в єдиній інтегральній структурі магнітотранзистора трьох функцій — вимірювання магнітного поля, керованого нагріву та вимірювання температури.

Перевагою побудови in-situ сенсорів термомагнітного аналізу на основі магнітотранзисторів є мультипараметричність їх режимів роботи, зокрема, такі режими керуються модуляцією струму емітера, зміщенням р-n переходів, значенням та знаком дрейфового поля в базовій області. Ця перевага створює можливості реалізації термомагнітних однокомпонентних вимірювальних перетворювачів з функцією вимірювання магнітного поля, керованого in-situ нагрівання та вимірювання температури. Керування процесами вимірювання з функціональним in-situ інтегруванням здійснюється сигнальним перетворювачем, який містить аналоговий фронт-енд (Analog Front-End) та мікроконтролер керування.

Розглянуто принцип функціонування та схема сигнального перетворювача інтегрованих in-situ сенсорів на структурах магнітотранзисторів. Враховуючи вимоги до сучасної мікроелектроніки, зокрема для сенсорних пристроїв Інтернету Речей, сигнальний перетворювач реалізовано на платформі програмованої системи на кристалі PSoC. Використано модуль CY8CKIT-059 PSoC 5LP Prototyping Kit. Розроблене програмне забезпечення керування процесом вимірювання, яке забезпечує можливість задавати: тривалість імпульсів нагріву; тривалість теплової релаксації; кількість вимірювань в кожному термічному циклі; коефіцієнти функцій вимірювального перетворення; API команди керування режимами роботи. Чутливість вимірювання магнітного поля становить 10 мкТ, а температури — 0,01 °С. Галузь застосування представленого вимірювального перетворювача — сенсорні пристрої термомагнітного аналізу в концепції Інтернету Речей, зокрема для матеріалознавства, біофізики та медицини.

References

- [1] Jurgons R., Seliger C., Hilpert A., Trahms L., Odenbach S. and Alexiou C. (2006) Drug loaded magnetic nanoparticles for cancer therapy. *Journal of Physics: Condensed Matter*, Vol. 18, Iss. 38, pp. S2893-S2902. DOI: 10.1088/0953-8984/18/38/s24
- [2] Duriagina Z., Holyaka R., Tepla T., Kulyk V., Arras P. and Eyngorn E. (2018) Identification of Fe₃O₄ Nanoparticles Biomedical Purpose by Magnetometric Methods. *Biomaterials in Regenerative Medicine*, . DOI: 10.5772/intechopen.69717
- [3] Ito A., Shinkai M., Honda H. and Kobayashi T. (2005) Medical application of functionalized magnetic nanoparticles. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, Vol. 100, Iss. 1, pp. 1-11. DOI: 10.1263/jbb.100.1
- [4] Jaeger R. and Blalock T. (2016) *Microelectronic circuit design*, McGraw-Hill Education, 1355 p.
- [5] Barylo G.I., Holyaka R.L., Prudyus I.N. and Fabirovskyy S.E. (2018) Impedance measurement front-end based on

- signal four-phase detection. *Visnyk NTUU KPI Seriya - Radiotekhnika Radioaparatobuduvannia*, Iss. 72, pp. 62-68. DOI: 10.20535/radap.2018.72.62-68
- [6] Stemple C.C., Kwon H. and Yoon J. (2012) Rapid and Sensitive Detection of Malaria Antigen in Human Blood With Lab-on-a-Chip. *IEEE Sensors Journal*, Vol. 12, Iss. 9, pp. 2735-2736. DOI: 10.1109/jsen.2012.2205072
- [7] Bassi A., Bauer M., Fiedler M., Kramp T., van Kranenburg R., Lange S. and Meissner S. eds. (2013) *Enabling Things to Talk: Designing IoT solutions with the IoT Architectural Reference Model*, Springer, 325 p. DOI: 10.1007/978-3-642-40403-0
- [8] *Success Stories. Ukrainian Scientists Develop Sensors for International Fusion Energy Research (25/37)*. Available at: <http://www.stcu.int/news/SuccessStories/index.php?id=29>
- [9] Bolshakova I., Holyaka R. and Gerasimov S. (2005) *Magnetic field measurement with continuous calibration*. Patent GB2427700A.
- [10] Popovich R.S. (2004) *Hall Effect Devices*. Institute of Physics Publishing; Bristol, UK, 307 p.
- [11] Holyaka R., Hotra Z., Weglarski M. and Marusenkova T. (2012) A field characteristic of magnetic sensors on the splitted Hall structures. *Electronika, Poland*, Vol. 53, No.5, pp. 50-55.
- [12] Leepattarapongpan C., Phetchakul T., Pengpad P., Srihapat A., Jeamsaksiri W., Chaowicharat E., Hruanun C. and Poyai A. (2014) The increase sensitivity of PNP-magnetotransistor in CMOS technology. *2014 International Symposium on Integrated Circuits (ISIC)*. DOI: 10.1109/isicir.2014.7029448
- [13] *PSoC® 5LP: CY8C52LP Family Datasheet: Programmable System-on-Chip*.
- [14] *CY8CKIT-050 PSoC 5LP Development Kit Guide*. Cypress Semiconductor Corporation. Available at: <http://www.cypress.com/file/45276/download>

Сигнальный преобразователь функционально интегрированных термомагнитных сенсоров

Барыло Г. И., Бойко О. В., Голяка Р. Л.,
Марусенкова Т. А., Прудыус И. Н.,
Фабировский С. Е.

Статья посвящена проблемам развития сенсорной электроники в соответствии с концепцией “Лаборатория на чипе” (Lab-on-Chip), “Программируемая система на кристалле” (Programmable System-on-Chip) и “Интернет вещей” (Internet of Things). Решается задача функционального интегрирования, основой которого является сочетание в одном устройстве нескольких взаимодополняющих методов измерения. Новизной полученных результатов является реализация сенсорного устройства термомагнитного анализа на однокомпонентной структуре латерального магнитотранзистора. Показано, что преимуществом построения in-situ сенсоров термомагнитного анализа на основе магнитотранзисторов является мультипараметричность их режимов работы. Это преимущество создает возможности реализации термомагнитных однокомпонентных измерительных преобразователей с расширенными функциональными возможностями, а именно, измерения магнитного

поля, управляемого нагрева и измерения температуры. Управление процессами измерения с функциональным in-situ интегрированием осуществляется сигнальным преобразователем, который содержит аналоговый фронт-энд и микроконтроллер управления. Представлены результаты аппаратно-программной реализации сигнального преобразователя. Область применения представленного измерительного преобразователя - сенсорные устройства термомагнитного анализа для материаловедения, биофизики и медицины.

Ключевые слова: микроэлектронный сенсор; сигнальный преобразователь; биомедицинская инженерия; функциональное интегрирование

Signal transducer of functionally integrated thermomagnetic sensors

Barylo G. I., Boyko O. V., Holyaka R. L.,
Marusenkova T. A., Prudyus I. N., Fabirovskyy S. E.

Introduction. The article is dealing with the sensors analog front-end development in accordance to concepts of Lab-on-Chip and Internet of Things. The task of functional integration, the basis of which is the combination of several complementary methods of measurement in one device, is pointed.

Basic approaches to functional integration. Functional integration provides the ability to use the same microelectronic structure for controlled heating, measuring the temperature, and measuring the changes of the investigated sample characteristics under the influence of external influence.

Functional integrated magneto-transistor converter. The main advantages of used magneto-transistors are high signal-to-noise ratio, increased resistance to magneto-induction interferences, and multi-modes and multi-functionality. The last advantage is decisive for solving the problem of a single chip functionally integration.

The principle of operation and the circuit diagram of the signal converter. The signal converter provides three functional properties on single chip magneto-transistor structure. The first is the magnetic field measurement. The second is controlled heating of the structure. And, the third property is the measurement of the temperature of the structure of the magneto-transistor with investigated substance placed on this structure.

Hardware-software implementation of the signal converter. The signal converter has been implemented on the Programmable System on Chip PSoC 5LP (Cypress Semiconductor). The module CY8CKIT-059 Prototyping Kit has been used. The developed software for controlling the measurement process provides controlling the duration of the heating pulses and relaxation, the number of measurements in each thermal cycle, coefficients of measuring transformation functions, API operating modes commands, etc.

Conclusions. The novelty of the obtained results is the implementation of the sensor device for thermomagnetic analysis on the lateral magneto-transistors single chip structure. The areas of application are sensors for materials science, biophysics and medicine in the concept of the Internet of Things.

Key words: microelectronic sensor; signal converter; biomedical engineering; functional integration