

УДК 681.586.72

В.С. ОСАДЧУК, О.В. ОСАДЧУК, О.П. БІЛИЛІВСЬКА

Вінницький національний технічний університет

АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ ПОЛЬОВИХ МАГНІТОЧУТЛИВИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Проведено порівняльний аналіз існуючих конструкцій польових первинних перетворювачів магнітного поля з точки зору їх чутливості, технологічної складності, здатності реєструвати різні складові магнітної індукції тощо. Запропоновано класифікацію польових магніточутливих елементів.

A comparative analysis of the existing structures of the field-effect magnetic field sensing devices of magnetic field is fulfilled. Their sensitivity, technological complexity, the ability to record various components of magnetic induction, etc. are taken into account. The classification of the magnetic field sensing elements is proposed.

Ключові слова: магнітне поле, магнітний сенсор, первинний перетворювач, чутливість, елемент Холла, магнітотранзистор, МОН-транзистор.

Вступ

Інтенсивний розвиток сучасної магнітовимірювальної техніки обумовлений не лише науковим інтересом, а й потребами промисловості, адже магнітні сенсори широко використовуються як для безпосереднього вимірювання магнітних величин, так і в якості проміжних перетворювачів для реєстрації частоти обертання, положення, відстані, кутових та лінійних переміщень, вимірювання струму, виявлення дефектів у магнітних матеріалах та виробках тощо.

Існуючі сенсори магнітного поля базуються на різних фізичних ефектах, тому вибір типу сенсора здійснюється із врахуванням діапазону вимірюваних магнітних полів, габаритних розмірів, конструкції, споживаної потужності, чутливості до зовнішніх умов, певних особливостей вимірювань і т.д. Напівпровідникові перетворювачі магнітного поля (елементи Холла, магніторезистори, магнітодіоди, магнітотранзистори, магніотиристри, складні магніточутливі структури тощо) при достатній для більшості промислових застосувань точності мають невеликі габарити, низьку ціну, споживають малу потужність та прості в експлуатації. Найбільшу чутливість серед таких сенсорів мають магнітотранзистори, що дозволяє в багатьох випадках замінити ними дорогі надпровідникові магнітометри та сенсори на основі ядерного магнітного резонансу. Перевагою польових магніточутливих елементів, крім зазначених вище переваг напівпровідникових сенсорів, є технологічна та електрична сумісність із МДН-транзисторами, завдяки чому такі елементи можна виготовляти на одному кристалі зі схемами обробки [1–4].

На сьогодні вітчизняними та закордонними науково-дослідними установами розроблено багато конструкцій польових магніточутливих елементів, і вони продовжують вдосконалюватись. Автори виділяють окремі типи елементів Холла та магнітотранзисторів, але чіткої їх класифікації досі не існує. Тому задача розробки класифікації польових магніточутливих елементів є актуальною. Метою роботи є порівняльний аналіз конструкцій польових первинних перетворювачів магнітного поля та створення їх класифікації.

Аналіз конструкцій польових перетворювачів магнітного поля

Вперше застосування структури метал–діелектрик–напівпровідник (МДН) у якості інтегрального сенсора магнітного поля було запропоновано ще в 1966 р. [5]. Поверхневий інверсійний шар, чи канал, може з успіхом слугувати дуже тонким елементом Холла. У цих приладах використовується ефект Холла чи відхилення носіїв заряду в інверсійному шарі. Польові елементи Холла (ПЕХ) можуть виготовлятися як за технологією КНІ (кремній на ізоляторі), так і за МДН-технологією. На рис. 1 наведено принципову структуру та схематичне зображення ПЕХ, виготовленого за технологією КНІ [4]. Прилад має затвор, а також вхідні та вихідні контакти. Крім того, є виводи від підкладки і спеціального екрануючого електрода, що забезпечує роботу приладу при малих керуючих струмах. Підкладка може бути використана як другий затвор.

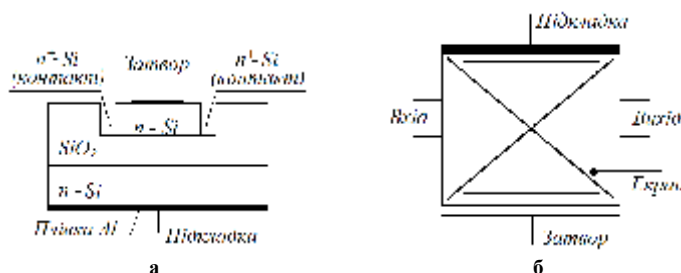


Рис. 1. Принципова структура (а) та схематичне зображення (б) ПЕХ за технологією КНІ [4]

Змінюючи потенціал затворів (верхнього або нижнього), можна регулювати залишкову напругу в ПЕХ, тобто змінювати різницю потенціалів між холлівськими контактами, що виникає при протіканні струму через первинний перетворювач за відсутності магнітного поля. Крім того, оскільки товщина шару кремнію в КНІ структурі (приблизно 200 нм) у декілька разів менша, ніж в стандартних кремнієвих елементах Холла, що виготовляються за епітаксальною технологією, чутливість ПЕХ пропорційно вища. Зменшення товщини провідного каналу за допомогою польового ефекту забезпечує можливість керування магнітною чутливістю ПЕХ, величина якої одного порядку з чутливістю елементів Холла на основі GaAs. Омичний опір «відкритого» каналу ПЕХ складає від 10 до 120 кОм, тому при стандартних значеннях напруги живлення (5 або 9 В) значення керуючого струму буде лише 50...400 мкА, що обумовлює не лише високу питому магнітну чутливість ПЕХ (до 10^4 В/(А·Тл), а й істотно нижчий рівень власних шумів, тобто високу порогову чутливість приладу. Розглянуті ПЕХ здатні реєструвати перпендикулярну до поверхні сенсора складову магнітного поля індукцією від 10^{-7} Тл [4].

Сенсор Холла на основі структури метал-оксид-напівпровідник (МОН) [6] являє собою польовий МОН-транзистор із каналом (Ch), над яким розташований затвор (G), областями витоку (S) та стоку (D), які виконують роль струмових контактів, а також двома додатковими високолегованими областями H, які використовуються для зняття напруги Холла (рис. 2). Ширина і довжина каналу позначена відповідно через W і L . Положення холлівських контактів описується їхньою відстанню від витоку y .

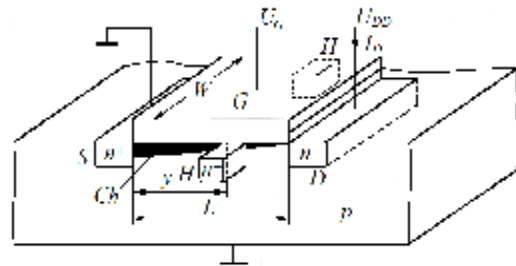


Рис. 2. Принципова структура польового МОН-елемента Холла [6]

МОН-технологія не вимагає застосування дорогих епітаксialьних структур і дозволяє значно зменшити керуючий струм елементів. Крім того, за МОН-технологією можна створювати дешеві мікропотужні магніточутливі і магнітокеровані інтегральні схеми [4].

Польовий МОН-елемент Холла відрізняється від звичайного тим, що у звичайному елементі Холла носії заряду забезпечуються самим матеріалом, а у МОН-приладі вони генеруються завдяки поверхневому ефекту поля. Напруга Холла в польовому елементі значно залежить від місця розташування холлівських контактів. Це пояснюється тим, що концентрація носіїв заряду у МОН-елементі зменшується при збільшенні відстані від витоку (y), а поле Холла при зменшенні концентрації носіїв збільшується. На практиці оптимальне положення холлівських контактів визначається з умови $0,7 \leq y/L \leq 0,8$ [6]. Розрахована абсолютна чутливість такого сенсора Холла складає $280 \text{ В} / (\text{А} \cdot \text{Т})$. Значним недоліком польового елемента Холла є вплив поверхневої рекомбінації на напругу Холла. Технологічно даний пристрій сумісний з МОН-технологією, оскільки високолеговані області холлівських контактів формуються одночасно із областями витоку і стоку, а решта структури не відрізняється від структури звичайного МОН-транзистора.

Розглянутий МОН-елемент Холла реєструє складову магнітного поля, перпендикулярну до поверхні кристалу. Існують також елементи Холла, які визначають паралельну складову, – вертикальні МОН-елементи Холла [4]. Сам вертикальний елемент Холла реалізований у вигляді послідовності n^+ – областей, виготовлених у вигляді паралельних смужок: перший струмовий контакт – перший вимірювальний контакт – другий струмовий контакт – другий вимірювальний контакт – третій струмовий контакт. За відсутності магнітного поля струм розподіляється рівномірно між першим – другим і другим – третім струмовими контактами, тому значення потенціалів на першому і другому вимірювальних контактах практично однакові. При дії зовнішнього магнітного поля в активній області елемента виникає компенсуюче поле Холла, яке призводить до виникнення різниці потенціалів на холлівських електродах і є мірою індукції магнітного поля [4].

Суттєвим недоліком елементів Холла, є значна температурна залежність ЕРС Холла, що потребує складних схем термокомпенсації. З цієї точки зору кращі характеристики мають магнітотранзистори. Одностокові магніточутливі МОН-транзистори використовуються як МОН-елементи Холла, розглянуті вище, оскільки вони у звичайному виконанні не забезпечують високу чутливість, як і польові магнітотранзистори із керуючим $p-n$ переходом [7]. Значно вищу чутливість мають багатостокові МОН-магнітотранзистори, що являють собою МОН-транзистори з двома-трьома розташованими поруч стоковими областями [6–9].

Принципова структура двостокового магніточутливого польового транзистора зображена на рис. 3 [6]. Транзистор має два стоки, D_1 та D_2 , які розташовані один біля одного та розділені ізолятором, тому струм витоку S розділяється між обома стоками рівномірно. При дії зовнішнього магнітного поля перпендикулярно до поверхні транзистора носії заряду під дією сили Лоренца відхиляються в бік одного зі стоків (залежно від напрямку складової індукції B_z), внаслідок чого струм одного стоку збільшується, а іншого – зменшується.

Відносна чутливість багатостокових магнітних сенсорів при малих значеннях магнітної індукції визначається виразом [6]:

$$S_R = \left| \frac{1}{I_{D1} + I_{D2}} \frac{\partial(I_{D1} - I_{D2})}{\partial B} \right|_{B=0}, \quad (1)$$

тобто як похідна відносного розбалансу струмів по магнітній індукції, узята при нульовій індукції. Через низьку холлівську рухливість носіїв в області каналу чутливість S_R виявляється низькою (2...3 %/Тл). Проте можна одержати

високі значення абсолютної чутливості, якщо транзистор працює в режимі насичення з підключеними до стокових елементів високоомними резисторами навантаження. У такому випадку корисний сигнал є різницею напруг між двома стоками.

У роботі [10] запропонований пристрій, названий авторами горизонтальним двостоковим магнітоточувливим польовим транзистором (рис. 4). Даний пристрій може бути використаний для вимірювання постійних та змінних полів. Він являє собою МОН-транзистором, який має два стоки та два затвори і працює в режимі збагачення, причому стокові області розташовані одна під одною та розділені ізолятором, тобто таку структуру можна назвати двостоковим МОН-транзистором із горизонтально розділеними стоками.

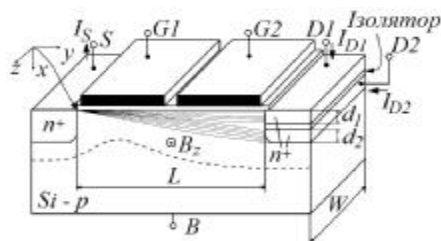


Рис. 4. Принципова структура горизонтального двостокового магнітоточувливого польового транзистора

Позитивна напруга на затворах G_1 та G_2 , V_{GS1} та V_{GS2} , індукує у транзисторі канал n -типу, а позитивна напруга на стоках, V_{DS1} та V_{DS2} , спричинює потік електронів від витoku S до стоків D_1 та D_2 , причому $I_S = I_{D1} + I_{D2}$ (I_S – струм витoku, I_{D1} та I_{D2} – струми першого та другого стоків відповідно). Потенціал затвору G_1 визначає струм витoku I_S , а потенціал затвору G_1 впливає на відношення стокових струмів I_{D1}/I_{D2} . Зовнішнє магнітне поле зумовлює відхилення потоків електронів до верхнього чи нижнього стоку в залежності від напрямку складової B_z , що приводить до дисбалансу стокових струмів, який є функцією ширини W та довжини L каналу, напруг зміщення V_{GS1} , V_{GS2} , V_{DS1} , V_{DS2} та магнітної індукції B [10]:

$$I_{D1} - I_{D2} = f(W, L, V_{GS1}, V_{GS2}, V_{DS1}, V_{DS2}, B). \quad (2)$$

За результатами теоретичних розрахунків, абсолютна чутливість такого сенсора може сягати 1000 В/Тл, а відносна чутливість за формулою (1) складає близько 100 %/Тл. Геометрична роздільна здатність такого магнітоточувливого польового транзистора визначається добутком довжини каналу L та товщини каналу X_{Ch} поблизу стоків, що значно більше, ніж роздільна здатність звичайного двостокового транзистора із вертикально розділеними стоками, яка визначається добутком ширини W та довжини L каналу. Це робить пристрій перспективним для розпізнавання магнітних образів чи зчитування даних. Однак його виготовлення потребує внесення змін до стандартної КМОН-технології для формування горизонтальних стоків.

У роботі [11] наведені результати досліджень впливу геометричних параметрів багатоелектродних польових магнітотранзисторів на їх характеристики, зокрема розглядаються прямокутні та секторіальні магнітоточувливі МОН-транзистори (рис. 5).

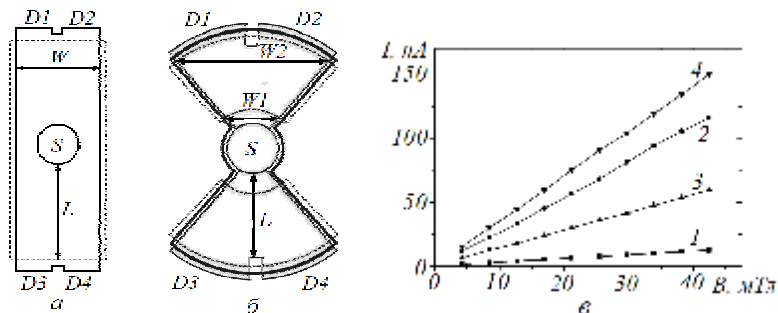


Рис. 5. Схематична структура прямокутного (а) і секторіального (б) магнітоточувливого польового транзистора та їх функції перетворення (в): L – довжина каналу; W , W_1 , W_2 – ширина каналу;

1 – $L = 40$ мкм, $W = 15$ мкм; 2 – $L = 40$ мкм, $W_1 = 20$ мкм, $W_2 = 45$ мкм;

3 – $L = 20$ мкм, $W = 15$ мкм; 4 – $L = 20$ мкм, $W_1 = 15$ мкм, $W_2 = 25$ мкм.

Найбільша чутливість (рис. 5, в) була отримана для секторіальної структури 2 (3,7 %/Тл), оскільки вона має менший струм стоку, ніж структура 4 (чутливість 1,44 %/Тл). Однак секторіальна структура із меншими розмірами має вищий рівень вихідного сигналу, що забезпечує вищу завадостійкість. Висока густина струму у секторіальних структурах із меншими розмірами має негативний вплив на чутливість, а у прямокутних структурах зі зменшенням розмірів зростає і чутливість (наприклад, структура 1 має експериментальну чутливість 0,57 %/Тл, а 3 – 2,05 %/Тл), і рівень вихідного сигналу [11].

Двостоківі транзистори можуть також відрізнятися за формою затвору, відповідно виділяють магнітотранзистори з увігнутим та випуклим затвором. Дослідженню впливу форми затвору на параметри двостоківового МОН-транзистора присвячена робота [12]. Схематична структура магніточутливих польових транзисторів з увігнутим та випуклим затворами зображена на рис. 6.

Експериментальні результати [12] показали, що найвища абсолютна чутливість S_A , чутливість, віднесена до струму живлення S_{RI} і до напруги S_{RV} , складають 1,39 В/Тл, 2004,8 В/А·Тл і 0,46 В/В·Тл для увігнутого двостоківового магнітотранзистора і 0,77 В/Тл, 512,4 В/А·Тл і 0,29 В/В·Тл для випуклого магнітотранзистора при напрузі джерела живлення 3 В. Геометричні розміри мають значний вплив на параметри магнітотранзисторів: транзистори із шириною $W = 40$ мкм, довжиною $L = 40$ мкм каналу та шириною зазору між стоками $d = 2$ мкм і порівнянні з

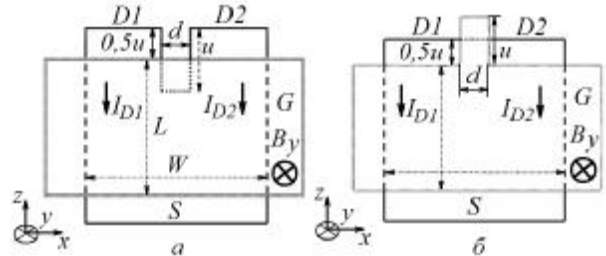


Рис. 6. Схематична структура магніточутливих польових транзисторів з увігнутим (а) та випуклим (б) затворами [12]: L , W – довжина та ширина каналу, d , u – ширина та довжина зазору між стоками

транзистором із такими самими шириною та довжиною каналу, але із $d = 4$ мкм має вищу чутливість, але гірші характеристики з точки зору геометричної корекції помилок. При зменшенні відношення ширини каналу до його довжини чутливість увігнутого транзистора зменшується більше, ніж випуклого. Взагалі, як увігнутий, так і випуклий магнітотранзистори потрібно виготовляти з широким стоковим зазором для збільшення лінійності пристрою [12].

Таким чином, розглянуто різні типи польових магніточутливих елементів, які відрізняються за технологією, конструкцією, геометричними розмірами та параметрами, встановлено, що найвищу чутливість мають польові двостоківі магнітотранзистори. При виборі тієї чи іншої конструкції потрібно орієнтуватись на найбільш важливі параметри магніточутливих пристроїв для конкретного застосування.

Класифікація польових магніточутливих елементів

На основі проведеного аналізу конструкцій польових магніточутливих елементів розроблена їх класифікація (рис. 7).



Рис. 7. Класифікація польових магніточутливих елементів

Дана класифікація враховує тип реалізованого напівпровідникового приладу, що виконує роль польового магніточутливого елемента, геометричні параметри тощо. При поділі первинних перетворювачів магнітного поля на вертикальні та горизонтальні [7] критерієм є напрям струму від витоку до стоку: якщо витік та стік сформовані в горизонтальній площині пластини, то такі транзистори є горизонтальними, якщо

ж основний напрям стуму перпендикулярний до поверхні пластини, то такі транзистори вертикальні. Серед розглянутих магніточутливих елементів виділені багатостокові МОН-магнітотранзистори, подальшим напрямком роботи є розробка приладу контролю параметрів магнітного поля на базі таких елементів.

Висновок

На основі проведеного аналізу існуючих польових первинних перетворювачів магнітного поля встановлено, що двостокові магнітотранзистори мають вищу чутливість, ніж інші польові магнітні сенсори. Кожен тип конструкції має певні переваги, але і певні недоліки. Тому при їх виборі потрібно враховувати, які параметри є важливішими для конкретного застосування. Розроблено класифікацію польових магніточутливих елементів за типом напівпровідникових приладів, за напрямком струму від витoku до стоку, технологією виготовлення, кількістю стоків та затворів, формою структури, розташуванням стоків, формою затвору.

Література

1. Егиазарян Г.А. Магнитодиоды, магнитотранзисторы и их применение / Г.А. Егиазарян, В.И. Стафеев. – М. : Радио и связь, 1987. – 88 с.
2. Мікроелектронні сенсори фізичних величин : [науково-навчальне видання в 3-х томах] / Вуйцік В., Готра З.Ю., Григор'єв В.В. та ін ; за ред. З.Ю. Готри. – Львів : Ліґа-Прес, 2003. – Т. 2. – 2003. – 595 с.
3. Осадчук В.С. Сенсори тиску і магнітного поля : [монографія] / В.С. Осадчук, О.В. Осадчук – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 207 с.
4. Бараночников М.Л. Микромагнитоэлектроника : [в 2 т.] / Бараночников М.Л. – М. : ДМК Пресс, 2001. – Т. 1. – 364 с.
5. Gallagher R.C. A metal-oxide-semiconductor Hall element / Gallagher R.C., Corak W.S. // Solid State Electron, 1966. – Vol. 9. – P. 571 – 580.
6. Popovic R.S. Hall effect devices. – Bristol; Philadelphia: Institute of Physics, 2004. – 419 p.
7. Викулин И.М. Гальваномагнитные приборы / Викулин И.М., Викулина Л.Ф., Стафеев В.И. – М. : Радио и связь, 1983. – 104 с.
8. Rubio C. Modelling, Design and Test of a Monolithic Integrated Magnetic Sensor in a Digital CMOS Technology Using a Switched Current Interface System / Rubio C., Bota S., Macías J. G., Samitier J. // Analog Integrated Circuits and Signal Processing, 2001. – No. 29. – P. 115–126.
9. Pat. 5,757,055 USA, Int. Cl⁶ H01L29/82. Triple drain magneto field effect transistor with high conductivity central drain / Jeffrey C. Kalb, Jr.; assignee: Intel Corporation. – appl. No. 718,058; filed 17.09.1996; published 26.05.1998.
10. Kordalski W. Horizontally-split-drain MAGFET – a highly sensitive magnetic field sensor/ Kordalski W., Polowczyk M., Panek M. // Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical sciences, 2007. – Vol. 55. – No. 3. – P. 325 – 329.
11. Daříček M. Behavior of various geometry MagFET structures / Daříček M., Donoval M., Šatka A. // Circuit Theory and Design, 2009. ECCTD 2009. European Conference on. – P. 17 – 20.
12. Sung G.M. Error correction for transformed concave and convex MAGFETs with dc supply voltage // Sensors and Actuators, 2005. – A 117. – P. 41 – 49.

Надійшла 17.5.2012 р.

Статтю представляє: к.т.н. Тарновський М.Г.

УДК 004.023

О.М. ШИНКАРУК, С.В. КРИВИЙ, І.В. БАЛАБАНОВ

Хмельницький національний університет

ВПЛИВ ОСОБЛИВОСТЕЙ КОНСТРУКЦІЇ НА МІЦНІСТЬ ДВОКІЛЬЦЕВОГО ДИНАМІЧНО НАСТРОЮВАНОГО ГІРОСКОПА

В статті вивчаються основні чинники, що визначають міцність двокільцевих ДНГ. При цьому розглядається ідеалізований пружний підвіс, який враховує тільки найбільш важливі елементи конструкції, що зумовлюють основні властивості пружного підвісу.

The article examines the main factors that determine the strength of two dynamically configurable ring gyroscopes. It is considered idealized elastic suspension, which only considers the most important design elements that determine the basic properties of an elastic suspension.

Ключові слова: гіроскоп, ротор, підвіс, навантаження.

Вступ

В даний час в системах орієнтації і управління рухливими об'єктами широке застосування як чутливі елементи знаходять динамічно настроювані гіроскопи (ДНГ) [1]. При цьому особливою популярністю користується конструкція ДНГ з двокільцевим пружним підвісом, що зумовлено її високою