

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

УДК 621.315.592

І.А. Большакова<sup>1</sup>, Р.Л. Голяка<sup>2</sup>, А.П. Мороз<sup>1</sup>,  
В.Е. Єрашок<sup>1</sup>, Т.А. Марусенкова<sup>1</sup>

Національний університет “Львівська політехніка”,  
<sup>1</sup>кафедра напівпровідникової електроніки,  
<sup>2</sup>кафедра електронних приладів

## СЕНСОРНІ ПРИСТРОЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА СЕНСОРАХ ХОЛЛА З РОЗЩЕПЛЕНОЮ СТРУКТУРОЮ

*Ó Большакова І.А., Голяка Р.Л., Мороз А.П., Єрашок В.Е., Марусенкова Т.А., 2009*

I. Bolshakova, R. Holyaka, A. Moroz, V. Yerashok, T. Marusenkova

## MAGNETIC FIELD SENSOR DEVICES ON THE HALL SENSORS WITH SPLITTED STRUCTURE

*Ó Bolshakova I., Holyaka R., Moroz A., Yerashok V., Marusenkova T. 2009*

Наведено принципи побудови сенсорних пристроїв магнітного поля на сенсорах Холла з розщепленою структурою. Показано, що шляхом відповідної конструктивної модифікації сенсорів Холла з розщепленою структурою вдається отримати нові функціональні можливості, зокрема, щодо підвищення просторової роздільної здатності та інтегрування декількох сенсорів в дво- та тривимірні структури.

The work is dealing with questions of new magnetic field sensor devices developing on the splitted structure base. It has been shown that by special structure modification of Hall sensors with splitted structure it is possible to achieve new functional abilities, in particular, concerning an improvement of space resolution and the sensors integration into two- and three dimensions structure.

### Вступ

Сенсори Холла є найпоширенішим типом гальваномагнітних вимірювальних перетворювачів магнітного поля. Типовий сенсор Холла (рис. 1, а) – це здебільшого напівпровідникова структура прямокутної форми з двома струмовими та двома потенціальними виводами, які розміщені симетрично вздовж струмової осі (траєкторії руху носіїв заряду) сенсора. Відповідною структурною модифікацією сенсорів Холла можна отримати вимірювальні перетворювачі з розширеними функціональними можливостями [1, 2].

Зокрема на рис. 1, б та в показані варіанти п'ятививідних сенсорів Холла, комбінація виводів яких дає змогу компенсувати залишкову (off-set) напругу, що виникає на потенціальних виводах за відсутності магнітного поля. Така залишкова напруга виникає внаслідок певної недосконалості, а саме – неідеальної симетричності структури сенсорів Холла. Компенсацію off-set напруги забезпечують перерозподілом струму між виводами I2, I3 (для конструкції рис. 1, б), або усереднюючи в певній пропорції напругу на потенційних виводах V2, V3 (для конструкції рис. 1, в).

Інший варіант модифікації структури, що дає змогу вимірювати розподіл (градієнт) магнітного поля вздовж струмової осі сенсора Холла, показано на рис. 1, г. Градієнт визначають вимірюванням холлівської напруги на послідовно розміщених потенціальних виводах  $V_{12}$ - $V_{11}$ ,  $V_{22}$ - $V_{21}$ ,  $V_{32}$ - $V_{31}$ .

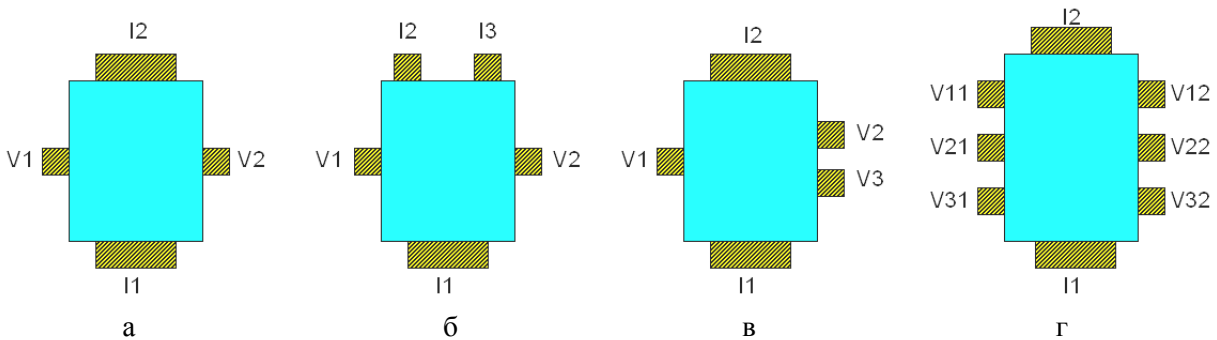


Рис. 1. Конструкції сенсорів Холла

Набувають популярності так звані вертикальні напівелементи Холла, комбінація яких дає змогу створити 3-D сенсори з чутливістю до двох і трьох ортогональних проекцій  $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$  вектора індукції магнітного поля  $\vec{B}$  [3]. Зокрема, на рис. 2, а показано об'ємну конструкцію багатовивідного сенсора Холла, виготовлену на основі мікрочистала InSb розміром  $3 \times 3 \times 0,5$  мм. Під час вимірювання  $V_z$  проекції вектора  $\vec{B}$  використовують пари виводів 4, 2 (наприклад, для живлення) та 1, 3 (відповідно для вимірювання напруги Холла). Під час вимірювання  $V_x$  та  $V_y$  проекцій струм живлення пропускають через вивід 5, забезпечуючи його рівномірний перерозподіл між виводами 1, 2, 3, 4. Враховуючи, що струми через мікрочистал течуть у чотирьох взаємно протилежних напрямках – між парами 5–1, 5–2, 5–3 та 5–4 струмових виводів, на парах потенціальних виводів 7–9 формується різниця напруг, обумовлена проекцією  $V_x$ , а на парах 6–8 – проекцією  $V_y$  вектора  $\vec{B}$ .

Можливий варіант реалізації активної частини 3-D сенсора на базі тонкоплівкової технології показано на рис. 2, б. Структура такого сенсора – це активний шар InSb завтовшки приблизно 10 мкм, що нанесений на підкладку напівізолюючого GaAs. Розмір сенсора  $2 \times 2 \times 0,5$  мм [4].

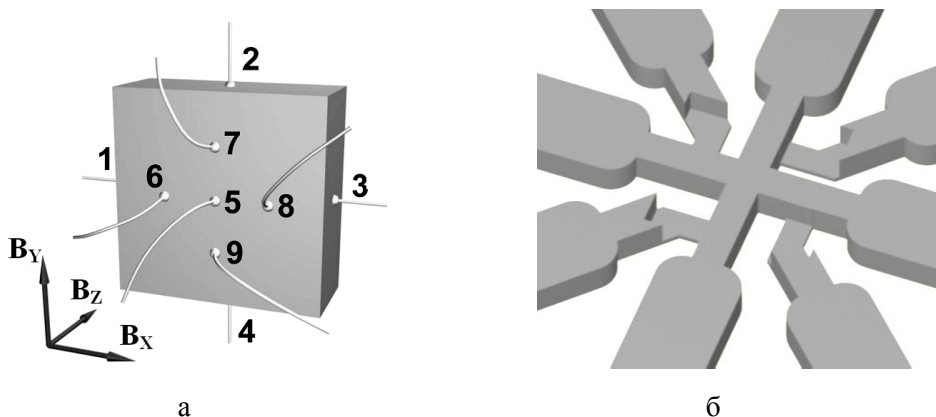


Рис. 2. Конструкції 3-D холлівських сенсорів

І все ж ці та інші відомі сенсори не вирішують проблеми високоточного вимірювання розподілу магнітного поля у безпосередній близькості до поверхні об'єкта, зокрема постійних магнітів, магнітних плівок, об'єктів з наведеними приповерхневими струмами тощо. Розглянемо детальніше цю проблему.

## Аналіз проблеми. Базове рішення

Традиційні сенсори Холла (рис. 1) можуть вимірювати лише проекцію магнітного поля, що є перпендикулярною до їх поверхні. Як це показано на рис. 2, а, немає жодних проблем з вимірюванням перпендикулярного до певної поверхні вектора індукції магнітного поля – для цього сенсор розміщують безпосередньо на цій поверхні. При цьому відстань  $d$  між вимірювальною поверхнею та активним шаром (чутливою областю) сенсора може бути достатньо малою – остання визначається товщиною підкладки, на яку нанесено активний шар. За відповідного потоншення підкладки вказана відстань становить 0,2...0,3 мм. Однак за необхідності вимірювати паралельні до поверхні поля структура сенсора має розміщуватися вертикально (рис. 3, б), що збільшує мінімально можливу відстань  $d$  між активною частиною сенсора та вимірювальною поверхнею до 1 мм і більше.

Частково проблема вимірювання розподілу приповерхневих магнітних полів вирішується вищерозглянутими 3-D сенсорами. Однак, на жаль, точність вимірювання розподілу магнітного поля 3-D сенсорами є недостатньо високою. Пояснюється це значним ефектом паразитної перехресної чутливості. Типово магнітна чутливість 3-D сенсорів до проекції  $B_z$  вектора індукції поля  $\vec{B}$  є на порядок вищою, ніж до двох інших  $B_x$ ,  $B_y$  проекцій, і що є більшою проблемою – вихідний сигнал, обумовлений проекціями  $B_x$ ,  $B_y$  істотно (до 10 % і більше) модулюється проекцією  $B_z$ .

Враховуючи, що перпендикулярна, тобто  $B_z$  складова приповерхневого магнітного поля, є значно більшою, ніж паралельні складові  $B_x$ ,  $B_y$ , а чутливості 3-D сенсорів до цих складових є значно меншими, ніж до  $B_z$  складової, використання існуючих 3-D сенсорів для вимірювання приповерхневих полів є малоефективним.

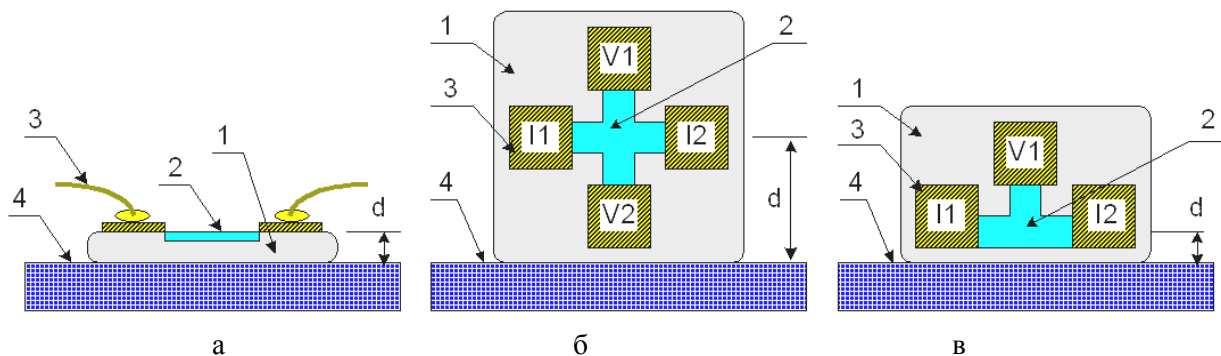


Рис. 3. Розміщення структур холлівських сенсорів на поверхні:  
1 – структура сенсора; 2 – активний шар; 3 – виводи; 4 – об'єкт вимірювання

У цій роботі поставлено завдання розроблення сенсорних пристроїв вимірювання приповерхневих магнітних полів з високою просторовою роздільною здатністю та мінімальною перехресною чутливістю. В основу розробки покладено ідею використання сенсорів Холла з розщепленою структурою, комбінація яких дає змогу створити нові високоефективні засоби вимірювання приповерхневих магнітних полів. Базова ідея (рис. 3, в) полягає у використанні лише однієї половини сенсора Холла – такий сенсор має два струмові і лише один потенціальний вивід. Вказана половинна структура уможливує мінімізувати відстань  $d$  між чутливою областю сенсора та вимірювальною поверхнею в перпендикулярній до цієї поверхні площині.

Є очевидним, що використання напівелементів Холла потребує іншого підходу у формуванні сигналу. У традиційних сенсорах Холла вихідним сигналом є різниця напруг, яка за відсутності магнітного поля принаймні в першому наближенні є нульовою. Натомість в сенсорах з розщепленою структурою необхідно створити опорну напругу, стосовно якої вимірюватиметься напруга на єдиному потенціальному виводі напівелемента.

На рис. 4 показано два варіанти такого формування сигналу. У першому варіанті (рис. 4, а) сенсор містить два максимально близько розміщені один до другого та до поверхні, магнітне поле

якої вимірюється, напівелементи HNS1, HNS2 (Half Hall Sensor). Очевидною є вимога відповідної орієнтації цих напівелементів – осі їх чутливості повинні збігатись, а знаки холлівських напруг  $V_{H1}$ ,  $V_{H2}$  бути взаємно протилежними. Інший варіант формування вихідного сигналу (рис. 4, б) передбачає використання резистивного подільника R1, R2, вихідна напруга якого  $V_R$  є половиною падіння напруги на напівелементі HNS і використовується як опорна. На рис. 4 показано особливості використання цих двох варіантів формування сигналу.

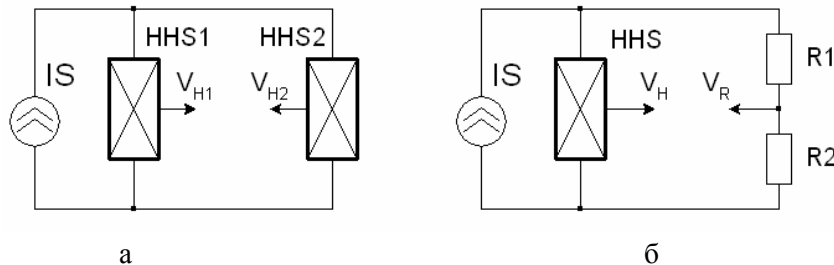


Рис. 4. Способи формування сигналу в сенсорах з розщепленою структурою

### Кутовий сенсор магнітного поля

На рис. 5 показано топологію, а на рис. 6 – фотографію нового конструктивного рішення сенсора Холла з розщепленою структурою, принципово важливою перевагою якого є можливість розміщення його чутливої області в кутовій ділянці підкладки сенсора [5]. Як буде показано далі, таке рішення дає змогу не лише розмістити цю кутову чутливу область з довільним нахилом до поверхні об'єкта вимірювання, але і сформувати на основі цієї структури високоефективний 3-D сенсор магнітного поля з високою просторовою роздільною здатністю.

Кутовий сенсор містить два холлівські напівелементи, об'єднані одним струмовим виводом IS. Робочий струм сенсора рівномірно розподіляється між цим виводом та іншими двома I1, I2. Потенціальні виводи V1, V2 напівелементів сформовані на однаковій відстані від струмових виводів, що забезпечує рівність синфазної напруги на потенціальних виводах. Натомість, як це показано на рис. 5, б, напруга Холла на цих виводах має протилежний знак. Вивід напруг V1, V2 проводиться через ділянки активного шару, що максимально наближені до кутової ділянки сенсора. Це забезпечує просторову роздільну здатність сенсора не гірше 0,2 мм, що на порядок краще, ніж в 3-D зондах магнітного поля на традиційних сенсорах Холла. Є очевидним, що за необхідності просторова роздільна здатність може бути поліпшена ще в декілька разів – її величина визначається лише фотолітографічними нормами, а тому принципів обмежень тут немає.

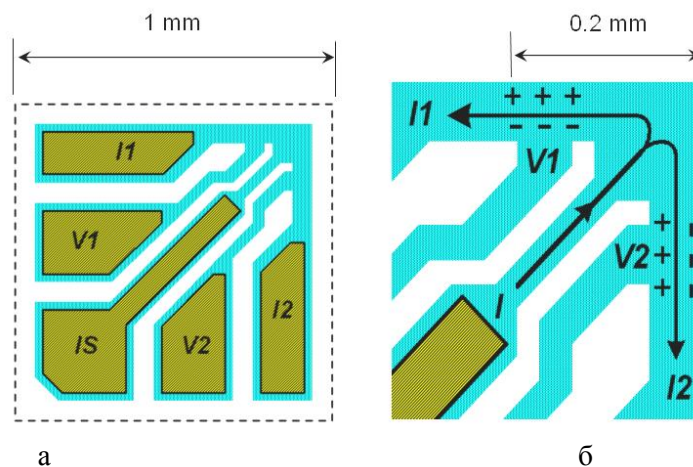


Рис. 5. Топологія (а) та принцип функціонування (б) кутового сенсора магнітного поля з розщепленою структурою

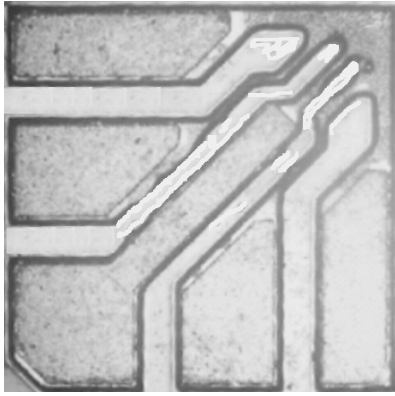
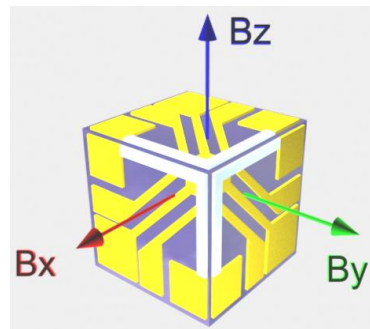


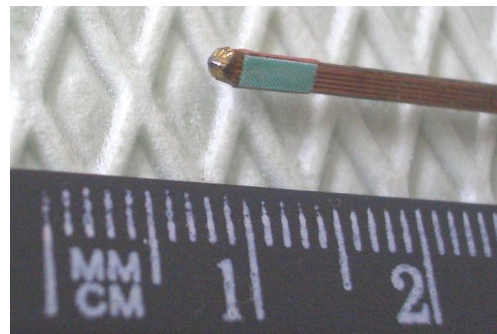
Рис. 6. Фотографія кутового сенсора

На базі трьох кутових сенсорів, площини яких утворюють три перпендикулярні грані куба, як це показано на рис. 7, можна сформувати 3-D сенсор магнітного поля. З огляду на параметри 3-D сенсора, важливим є:

- по-перше, чутливі області кутових сенсорів, розміщені на вершині куба, забезпечують можливість безпосереднього контакту цієї вершини з досліджуваною поверхнею;
- по-друге, усі три кутові сенсори є нахиленими до досліджуваної поверхні приблизно на  $45^\circ$ , що забезпечує максимально високу кутову чутливість 3-D сенсора до усіх проекцій вектора індукції приповерхневого магнітного поля;
- по-третє, на протигагу від відомих 3-D сенсорів, які за фізичним принципом роботи передбачають використання товстих активних шарів, кутові сенсори виготовляються на активних шарах з мінімальною товщиною ( $\approx 1$  мкм) і це забезпечує їх високу магнітну чутливість (типово 100–300 мВ/Т) та мінімальну паразитну перехресну чутливість (0,03–0,3 %).



а



б

Рис. 7. Об'ємна 3-D структура (а) та фотографія зонда (б) на основі кутових сенсорів

Важливою є також можливість реалізації такого 3-D сенсора за масовою технологією традиційних тонкоплівкових сенсорів Холла, що забезпечує мінімальні затрати на освоєння їх виробництва. Фотографію 3-D зонда для вимірювання просторового розподілу вектора індукції приповерхневих магнітних полів показано на рис. 7, б.



Рис. 8. Фотографія портативного 3-D магнітометра на основі кутового сенсора магнітного поля

Основними його параметрами є:

- магнітна чутливість (для усіх проекцій  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$ ) – не менше 200 мВ/Т;
- паразитна перехресна чутливість – не більше 0,1 %;
- просторова роздільна здатність – не гірша за 0,2 мм;
- температурний діапазон експлуатації – від 77 до 500 К;
- номінальний струм живлення – 20 мА.

Вищезрозглянуті розщеплені кутові сенсори Холла та 3-D зонд стали основою розроблення портативного магнітометра для дослідження просторового розподілу

приповерхневих магнітних полів (рис. 8). Крім вимірювання трьох проєкцій  $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$  вектора індукції магнітного поля, прилад дає змогу вимірювати температуру зонда. Керування приладом на вивід результатів вимірювання на матричний рідкокристалічний індикатор здійснюється мікроконтролером ADuC841.

### 2-D сканер магнітного поля

Іншим варіантом використання сенсорів Холла з розщепленою структурою є 2-D сканер магнітного поля, базовий багатовивідний напівелемент якого показано на рис. 9 та 10 [6]. Такий напівелемент – це одна з симетричних частин одновимірного сканера (рис. 1, в). Як і в попередньо розглянутому кутовому сенсорі, такий напівелемент дає змогу розмістити його під довільним кутом до досліджуваної поверхні за мінімальної відстані між чутливою областю сенсора та поверхнею.

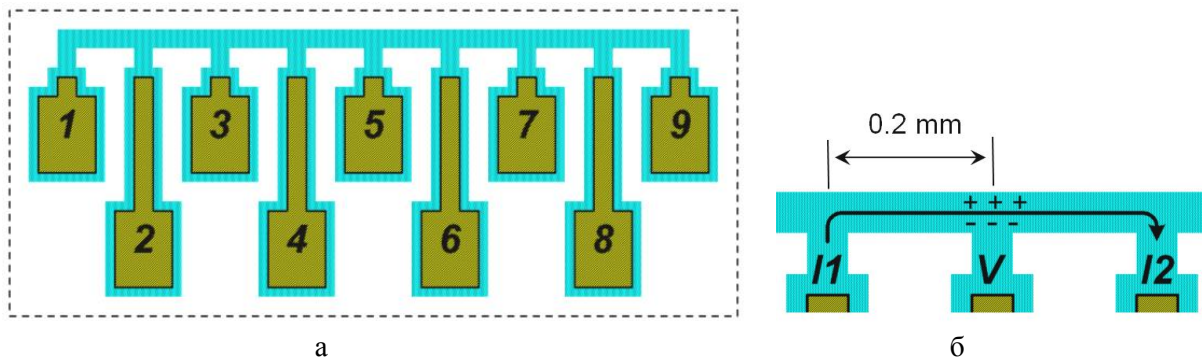


Рис. 9. Топологія (а) багатовивідного холлівського напівелемента та принцип формування напруги (б) в схемі з комутованим колом живлення



Рис. 10. Фотографія багатовивідного холлівського напівелемента

Враховуючи, що напівелемент сканера не має симетричної частини, існує проблема формування лінійки опорних напруг. Таке формування можна здійснити двома схемами – з об'єднаним (рис. 11, а) або комутованим (рис. 11, б) колами живлення. Реалізація першої з них є простішою – паралельно до струмового кола напівелемента під'єднується струмовий подільник, резистори якого формують лінійку опорних напруг  $V_{R1}$ ,  $V_{R2}$ , ...  $V_{R7}$ , кожна з яких відповідає синфазній складовій вихідної напруги на потенціальних виводах напівелемента  $V_{H1}$ ,  $V_{H2}$ , ...  $V_{H7}$ .

Однак в процесі експериментальних досліджень польових характеристик багатовивідних напівелементів нами встановлено, що синфазні складові напруг таких напівелементів модулюються магніторезистивним ефектом. Цей ефект вносить значну нелінійність функції перетворення, причому на кожному з потенціальних виводів ця нелінійність є іншою. Не вдаючись в детальний аналіз впливу магніторезистивної складової на нелінійність функції перетворення (цей матеріал винесено в окрему публікацію), відзначимо, що для вирішення цієї проблеми схема формування сигналу повинна ґрунтуватися на комутованому колі живлення (рис. 10, б). Такий спосіб формування сигналу передбачає під'єднання струму через виводи, які межують з потенціальним

виводом, на якому вимірюють напругу, наприклад, під час вимірювання напруги  $V_{H3}$  на третьому виводі струм живлення пропускають через другий та четвертий виводи.

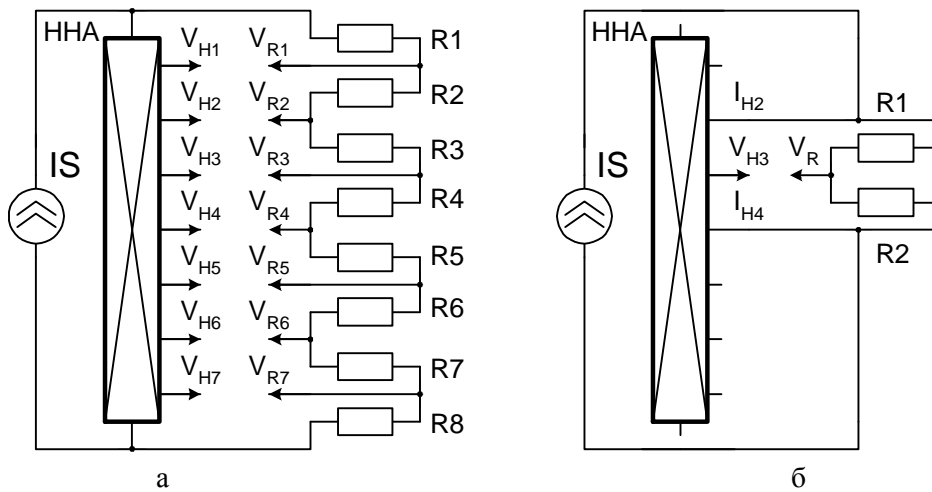


Рис. 11. Схеми формування сигналу багатовивідного сенсора Холла з розщепленою структурою: об'єднане (а) та комутоване (б) кола живлення

Отже, коло живлення постійно перемикається і це вимагає використання прецизійних аналогових комутаторів не лише в потенціальних колах, але і в колах живлення. Незважаючи на те, що за такого рішення кількість елементів комутації зростає втричі, його ефект є істотним – нелінійність функції перетворення зменшується залежно від абсолютної величини поля у 10–30 разів. Під час експериментів ми показали, що нелінійність функції перетворення з використанням комутованого кола живлення не уступає традиційним симетричним сканерам магнітного поля і знаходиться в межах 1% в полі 1 Т.

Для формування 2-D сканера магнітного поля два розглянуті напівелементи Холла розміщують під прямим кутом, об'єднуючи чутливі області напівелементів в просторово суміщений масив сенсорів S1, S2...S7 (рис. 12). Як і в 3-D зондах, на кутових сенсорах Холла чутлива область 2-D сканера може безпосередньо контактувати з досліджуваною поверхнею, що робить цей пристрій унікальним засобом дослідження просторового розподілу приповерхневих магнітних полів.

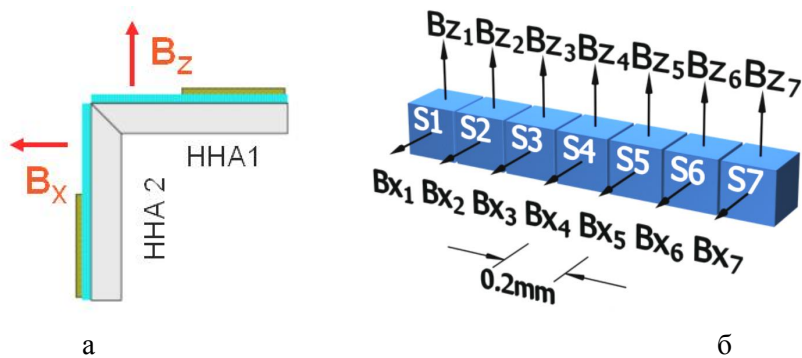


Рис. 12. Розміщення напівелементів холлівських сенсорів з розщепленою структурою (а) та структура 2-D сканера (б) на їх основі

### Висновки

У роботі наведено результати розробки нових сенсорних пристроїв магнітного поля на сенсорах Холла з розщепленою структурою. Розщеплена структура – це структурно незалежна частина гальваноманітного перетворювача холлівського типу, що містить лише один потенціальний вихід. Відповідною конструктивною модифікацією на основі таких структур

реалізовані 3-D зонд та 2-D сканер магнітного поля, унікальними параметрами яких є висока просторова роздільна здатність, низький рівень паразитної перехресної чутливості та можливість розміщення чутливої області сенсорів безпосередньо на поверхні досліджуваного об'єкта. Пріоритетним застосуванням розроблених пристроїв є дослідження просторового розподілу приповерхневих магнітних полів.

1. Popovic R.S., *Hall Effect Devices. Second edition. Adam Hilger, Bristol, Philadelphia and New York, 2002.* 2. Большакова І.А., Гладун М.Р., Голяка Р.Л., Готра З.Ю., Лопатинський І.Є., Потенцікі Є., Сопільник Л.І. *Мікроелектронні сенсорні пристрої магнітного поля / За ред. З.Ю. Готри. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту "Львівська політехніка", 2001.* 3. Burger F., Besse P.-A., Popovic R.S. *New fully integrated 3-D silicon Hall sensor for precise angular-position measurements. Sensors and Actuators. A 67. – 1998. – P. 72–76.* 4. Большакова І.А., Голяка Р.Л., Макидо О.Ю., Марусенков А.В. *Тонкоплівковий гальваномагнітний 3-D сенсор // Вісн. Нац. ун-ту "Львівська політехніка". – 2006. – № 558: Електроніка. – С. 35–42.* 5. Пат. № 72832 Україна, МКИ 7 G 01 R 33/06, Н 01 L 43/06. *Вимірювальний перетворювач магнітного поля / І.А. Большакова, Р.Л. Голяка (Україна). – № 2003065533; Заявл. 13.06.03; Опубл. 15.04.05, Бюл. №4.* 6. Пат. № 73816 Україна, МКИ 7 G 01 R 33/06. *Вимірювальний перетворювач магнітного поля / І.А. Большакова, Р.Л. Голяка (Україна). – № 2003065532; Заявл. 13.06.03; Опубл. 15.09.05, Бюл. № 9.*