

## РАВНИННО-МАГНИТОЧУВСТВИТЕЛЕН МИКРОСЕНЗОР НА ХОЛ

### IN-PLANE MAGNETOSENSITIVE HALL MICROSENSOR

**S. V. Lozanova**

*Institute of Robotics at Bulgarian Academy of Sciences*

“Acad. G. Bonchev” Str., Bl.2, Sofia 1113, Bulgaria

*Email: lozanovasi@abv.bg*

#### Abstract

*A functionally integrated in-plane magnetosensitive device is proposed where, for the first time, its no-circuitry output is the sum of all Hall voltages generated within the structure. The specific focus of the solution is that the supply is concentrated into two sources operating in constant current mode. Through the original construction two individual Hall elements in the plate is formed. The advantages are the possibility for independent control of the sensitivities of the two Hall elements; the opposite output signs of the separate Hall devices allow for the offset and its temperature drift to be drastically reduced - the residual offset is about 140 times smaller than the single configuration one, and through the used fabrication technology, high sensitivity of  $S_{RI} \approx 171$  V/AT is reached. The signal-to-noise ratio is increased and the lowest detected induction is improved,  $B_{min} \approx 9$   $\mu$ T. This performance is very promising for industrial applications.*

**Keywords:** silicon Hall microsensor, in-plane magnetosensitive device, double Hall element, Lorentz force

#### ВЪВЕДЕНИЕ

Един от най-разпространените равнинно-магниточувствителни елементи на Хол е структурата с пет планарно разположени контакти (5С). Тя съдържа силициева пластина с  $n$ -тип примесна проводимост конфигурирана като правоъгълен паралелепипед. Върху едната ѝ страна и на разстояние един от друг са формирани последователно петте контакта, които са омични и с правоъгълна форма – първи  $C_1$ , втори  $C_2$ , трети  $C_3$ , четвърти  $C_4$  и пети  $C_5$ . Всички те са успоредни помежду си. Първият  $C_1$  и петият  $C_5$ , и съответно вторият  $C_2$  и четвъртият  $C_4$  контакт са симетрично разположени спрямо третия  $C_3$ , който е централен, [1 - 3]. Първият и петият контакт са съединени непосредствено и през токоизточник  $E_s$  са свързани с централния електрод  $C_3$ . В резултат захранващият ток  $I_{in} \equiv I_{C3}$  се разделя на две равни части  $I_{in}/2 = I_{C1} = I_{C5}$ , които се инжектират в двата крайни захранващи контакта  $C_1$  и  $C_5$ . Така токът  $I_{in}$  в сензора представлява два противоположно насочени потока. Зоните между захранващите контакти  $C_1$ ,  $C_5$  и  $C_3$ , и в областите под тях съдържат съответно хоризонтални и верти-

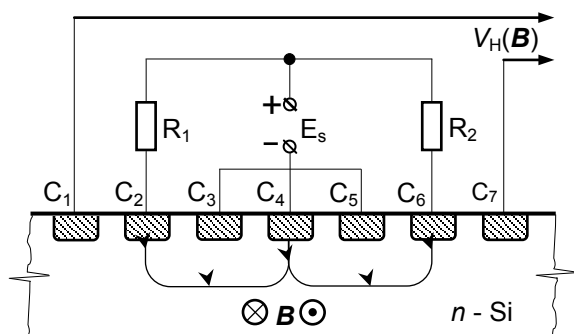
кални токови компоненти. Вторият  $C_2$  и четвъртият  $C_4$  контакт са диференциалният изход  $V_H(\mathbf{B}) \equiv V_{C2,4}(\mathbf{B})$  на микросензора на Хол. Измерваното магнитно поле  $\mathbf{B}$  е успоредно както на равнината на подложката, така и на дългите страни на контактите, [1 - 6]. Именно тази специфика дава наименованието на този клас елементи равнинно-магниточувствителни. Действието на Холовия преобразувател се основава на силата на Лоренц  $\mathbf{F}_L$ , която променя разпределението на потенциалите наляво и надясно от централния контакт  $C_3$ . Независимо от множеството технологични подобрения, този елемент на Хол притежава сериозни недостатъци. Неговата метрологична точност е редуцирана в резултат на високия офсет - паразитното изходно напрежение  $V_H(B=0) \neq 0$  в отсъствие на магнитно поле  $\mathbf{B}$  и намаленото отношение сигнал/шум, поради нарастналата стойност на нискочестотния (фликер) шум  $1/f$ ,  $f \leq 10^3$  Hz. Шумът  $1/f$  основно се генерира от дискретната природа на захранващия ток, който протича хоризонтално през зоните с изходните контакти както и от дефектите по повърхността, [5,6]. Освен това магниточувствителността

на този елемент е принципно понижена от използване само на напрежението на Хол, генерирано от двете срещуположно насочени хоризонтални компонента на захранващия ток  $I_{C_3,C_1}/2$  и  $-I_{C_3,C_5}/2$ . Вертикалните потоци на тока  $I_{in}$  практически не участват във формирането на изходния сигнал, [4,7]. Най-разпространеният способ за повишаване на напрежението на Хол е усилването, което обаче вкарва допълнителен шум и ефектът от този подход е незначителен.

В настоящата статия е представен силициев равнинно-магниточувствителен микросензор на Хол със съществено подобрени метрологични характеристики. Той съдържа седем контакта 7С и в отличие от 5С модификациите, при него се използват като изходен сигнал сумирани всички генерирани напрежения на Хол от захранващия ток.

## КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИП НА ДЕЙСТВИЕ

Микросензорът на Хол съдържа *n*-Si подложка с примесен тип проводимост, върху едната страна на която са формирани последователно и на разстояние седемте планарни контакти  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$  и  $C_7$ , Фиг. 1. Те са омични и с правоъгълна форма. Електрод  $C_4$  е централен, а останалите са симетрични спрямо него. Контактите са заобиколени с дълбок правоъгълен *p*-ринг. Неговото предназначение е да ограничи разтичането на повърхностните токове и да дефинира в обема на подложката сензорната зона.



Фиг. 1. Напречно сечение на новия равнинно-чувствителен микросензор на Хол. Омичните контакти са заобиколени с дълбока *p*-зона.

Специфичен фокус на решението е, че с един източник  $E_s$  захранването на сензора е организирано в два генератора на ток. Това се осъществява с два еднакви по стойност

товарни резистори  $R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ , които са най-малко на порядък по-големи от вътрешното съпротивление на структурата, съставляващо около  $870 \Omega$ , Фиг. 1. Изводите с една и съща полярност на генераторите на ток са свързани с контакти  $C_2$  и  $C_6$ , а другият извод е включен към централния електрод  $C_4$ . Захранващите контакти  $C_2, C_6$  и  $C_4$  представляват екипотенциални равнини, към които в отсъствие на външно магнитно поле  $\mathbf{B}, B = 0$ , токовете компоненти  $I_2, I_4$  и  $I_6$  са винаги перпендикулярни спрямо горната страна на *n*-Si подложка и проникват дълбоко в обема ѝ около  $30 - 40 \mu\text{m}$ . В останалата част на пластината те са успоредни на горната ѝ повърхност. Следователно токовете компоненти  $I_{C_4,2}$  и  $I_{C_4,6}$  са криволинейни. Прилагането на външно магнитно поле  $\mathbf{B}$  успоредно на равнината на пластината, чрез силите на Лоренц  $\mathbf{F}_{L,i} = q\mathbf{v}_{dr} \times \mathbf{B}$  осъществява дефлексия на токоносителите, респективно на траекториите  $I_{C_4,2}$  и  $I_{C_4,6}$ , където  $q$  е елементарният товар на електрона, а  $v_{dr}$  е средната дрейфова скорост на движение на носителите. В резултат криволинейните траектории се свиват и/или разширяват в зависимост от посоките на двата тока  $I_{C_4,2}$  и  $I_{C_4,6}$  (полярността на източника  $E_s$ ), и на магнитното поле  $\mathbf{B}$ . По тази причина при равни токове  $I_{C_4,2} = I_{C_4,6}$ , две двойки потенциала на Хол с еднаква стойност, но с противоположен знак се генерират върху горната повърхност с контактите,  $V_{HC1}(\mathbf{B})$  и  $-V_{HC3}(\mathbf{B})$ ; и съответно  $V_{HC5}(\mathbf{B})$  и  $-V_{HC7}(\mathbf{B})$ . Следователно в новото решение ясно са разграничени ефектите на Хол от вертикалните и хоризонталните компоненти на захранващия ток като напреженията на Хол са две:  $V_{HC1,3}(\mathbf{B})$  и  $-V_{HC5,7}(\mathbf{B})$ ,  $V_{HC1,3}(\mathbf{B}) = |-V_{HC5,7}(\mathbf{B})|$ . Ето защо новият микросензор на Хол съдържа два функционално интегрирани четири контактни (4С) елемента на Хол с равнинна чувствителност и обща преобразователна зона, [8-10]. В резултат на генераторите на ток действието на тези два елемента е независимо един от друг, Фиг. 1. Чрез електрическата връзка на контакти  $C_3-C_5$  двете напрежения на Хол се сумират алгебрично чрез диференциалния изход  $V_H(\mathbf{B})$ , докато почти еднаквите по стойност и знак паразитни офсети се изваждат, [10]. За повишаването на чувствителността съдейства магнитноуправляемият повърхностен ток в проводящите материали, [11].

Анализът на новия микросензор на Хол показва: 1). той съдържа два функционално интегрирани елемента на Хол; 2). магнито-чувствителността е повишена чрез алгебричното сумиране на всички генерирани в структурата напрежения на Хол; 3). паразитните офсети на двата елемента поради общата преобразователна зона и реализацията в единен технологичен цикъл са практически еднакви по стойност и са с един и същ знак, и при алгебричното сумиране те се изваждат, т.е. осъществява се редуциране на офсата; 4). температурният дрейф на офсетите също е драстично минимизиран, и 5). отношението сигнал/шум е повишено.

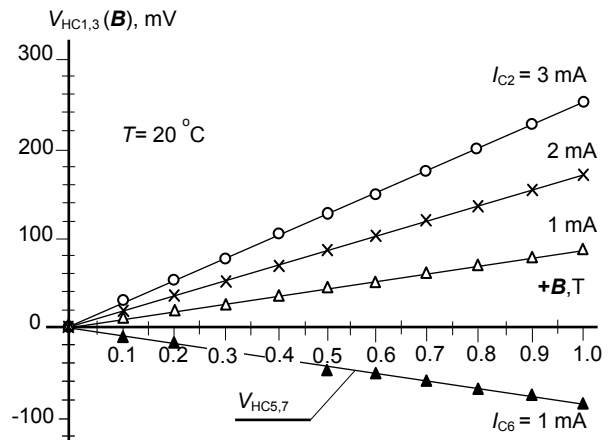
## РЕАЛИЗАЦИЯ НА МИКРОСЕНЗОРА НА ХОЛ

Експерименталният прототип на микросензора на Хол с равнинна чувствителност е реализиран с част от процесите, използвани в биполярната IC технология с любезното съдействие на колегите от Imtek, Фрайбург, Германия. Силициевите пластини са с дебелина 300  $\mu\text{m}$  и специфично съпротивление  $\rho \approx 7.5 \Omega \cdot \text{cm}$ , концентрацията на примесните атоми и електроните съставлява  $N_D = n_0 \approx 4.3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ . Технологичната реализация, аналогично на [12] е осъществена с четири маски. Маска 1 определя отворите за  $n^+$  имплантацията на омичните контакти  $C_1, C_2 \dots C_7$  с  $n$ -Si подложка като дълбочината на  $n^+$ - $n$  зоните е около 1  $\mu\text{m}$ . Легиращата донорна концентрация  $n^+$  при имплантацията съставлява  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$ . Маска 2 дефинира дълбокия правоъгълен  $p$ -ринг като на повърхността ширината му е около 25  $\mu\text{m}$  (по маска). Маска 3 е предназначена за метализацията на шините и площадките за бондиране. Маска 4 дефинира контактните отвори върху  $\text{SiO}_2$  слой на повърхността за електричните контакти между метала и  $n^+$ -областите. Размерите на омичните правоъгълни контакти  $C_1, C_2 \dots C_7$  са  $5 \times 20 \mu\text{m}^2$  при разстояние между тях 10  $\mu\text{m}$ . Експериментите са осъществени на тъмно с електромагнит от тип на Вайс с водно охлаждане и прецизен измервателен модул с обща грешка около 3 %.

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ

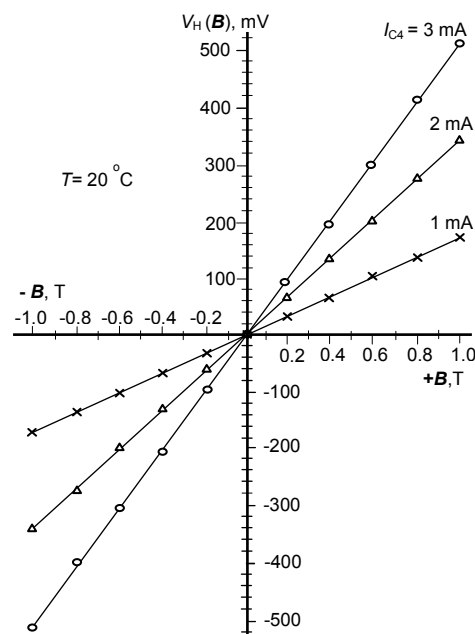
Основните сензорни характеристики на микросензора на Хол са показани на

Фигури 2 – 5. Двата 4С елемента на Хол  $C_1-C_2-C_3-C_4$  и  $C_4-C_5-C_6-C_7$  функционират независимо един от друг, поради избрания режим на работа, Фиг. 2.



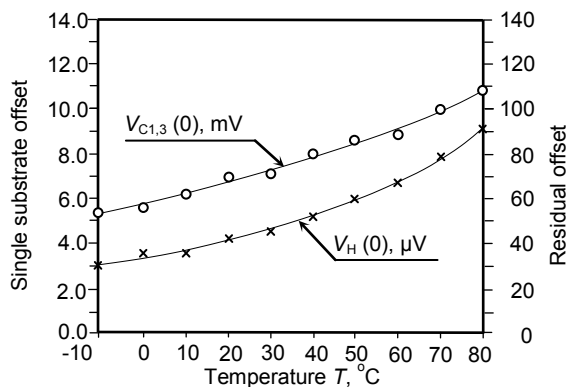
Фиг. 2. Магнитно управление на елементите на Хол  $C_1-C_2-C_3-C_4$  и  $C_4-C_5-C_6-C_7$ , функциониращи независимо един от друг – промяната на тока  $I_{C6}$  с резистора  $R_2$  модулира изхода само на елемента  $C_4-C_5-C_6-C_7$ .

Техните чувствителности  $S_{RI}$  при еднакви токове са равни по стойност и с противоположен знак,  $S_{RI} \approx 85 \text{ V/AT}$ . При същите токове изходното напрежение на Хол  $V_H(B)$  на сензора от Фиг. 1 е удвоено, достигайки  $S_{RI} \approx 171 \text{ V/AT}$ , Фиг. 3.



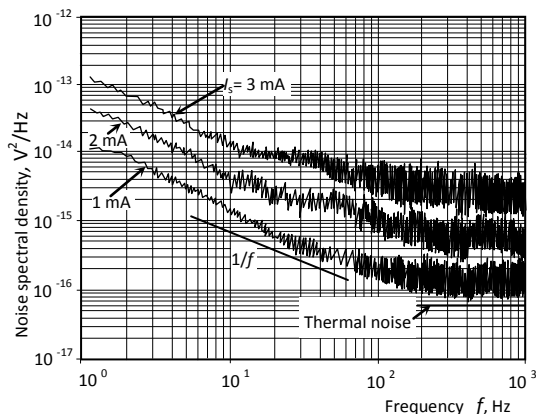
Фиг. 3. Изходни характеристики  $V_H(B)$ , при параметър захранващия ток. Чувствителността на новия микросензор е удвоена,  $S_{RI} = 171 \text{ V/AT}$

Преобразувателната ефективност на добре известния 5С микросензор на Хол  $C_2-C_3-C_4-C_5-C_6$ , при същите начални условия е  $S_{R1} \approx 122$  V/AT. Фактически новата конструкция е с около 30 % по чувствителна от 5С варианта.



**Фиг. 4.** Температурни зависимости на офсета за единичен елемент на Хол  $V_{C1,3}(0)$  и на новия микросензор  $V_H(0)$  при ток  $I_{C4} = 3$  mA

Остатъчният офсет  $V_H(0)$  след алгебричното сумиране на изходните сигнали на двата единични елемента на Хол както и температурният дрейф на микросензора от Фиг. 1 са драстично редуцирани спрямо тези параметри при единичните елементи на Хол. Остатъчният офсет на изхода на микросензора е около 140 пъти по-нисък при температура  $T = 30$  °C в сравнение с този на единичен елемент, Фиг. 4.



**Фиг. 5.** Спектрална плътност на шума на седемконтактния микросензор на Хол без магнитно поле, при параметър тока  $I_{C4}$ ,  $T = 20$  °C

Чрез нарастналото отношение сигнал/шум и понижения фликер  $1/f$  шум, Фиг. 5, е постигната подобрена резолюция при минимално регистрираната магнитна индукция,  $B_{min} \approx 9$   $\mu$ T. Тази стойност е постигната при честота  $f \leq 500$  Hz и отношение сигнал/шум = 1. Предстои изследване на термичния шум (шум на Джонсън-Найквист) при  $f > 1$  kHz, генериран основно от вътрешното съпротивление на сензора както и генерационно-рекомбинационните шумове на образците.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Новият микросензор на Хол се характеризира с драстично редуциран офсет и температурен дрейф, висока магниточувствителност и нарастнало отношение сигнал/шум, водещо да повишена резолюция при детектиране на минималната индукция. Постигнатият перформанс на новия преобразувател е подходящ за множество безконтактни приложения в роботиката, медицината, индустрията, автоматизацията и др. Освен тях следва да се добавят сензорните модули в автомобилите, индикиращи наличието на отворени врати по време на движение, в пералните машини за определяне скоростта на въртене на барабаните, при кафе-машините за регистриране нивото на водата, за определяне количеството на горивото (бензин и дизел) в цистерните, при климатиците и вентилаторите за регистриране скоростта на въртене на двигателите и др. На основата на новата модификация равнинно-чувствителен микросензор на Хол се планира конструиране на 2D и 3D магнитометри.

*Изследванията са осъществени с финансовата подкрепа на ФНИ по проект № DN 07/18 – 15.12.2016.*

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Popovic R., The vertical Hall-effect device, IEEE Electron Device Letters, 5(9) (1984) 357-358.
- [2] Huizer A.M.J., Baltès H.P., Numerical modeling of vertical Hall-effect devices, IEEE Electron Device Letters, 5(9) (1984) 482-484.

- [3] Popovic R., Integrated Hall element, US Patent 4 782 375/01.11.1988.
- [4] Kaufmann T., On the offset and sensitivity of CMOS-based five-contact vertical Hall devices, Der Andere Verlag, Uelvesbul, MEMS Technol. Eng. 21, 2013, 147; ISBN: 978-3-86247-374-8.
- [5] Roumenin Ch., Solid State Magnetic Sensors, Elsevier, Amsterdam, 1994, p. 450; ISBN: 0 444 89401.
- [6] Roumenin Ch., Microsensors for magnetic field, Ch. 9, in „MEMS – a practical guide to design, analysis and applications”, ed. by J. Korvink and O. Paul, William Andrew Publ., USA, 2006, p. 453-523; ISBN: 0-8155-1497-2.
- [7] Lozanova S.V., Roumenin C.S., Parallel-field silicon Hall effect microsensors with minimal design complexity, IEEE Sens. J., 9 (7), 2009, 761–766.
- [8] Roumenin C.S., Kostov P.T., Semiconductor Hall element, Bulg. Patent № BG 39283 B/08.01.1985.
- [9] Roumenin C.S., Kostov P.T., Silicon Hall-effect microsensor, Compt. rendus Acad. Bulg. Sci., 39(5) (1986) 63-66.
- [10] Steiner R., Rotary switch and current monitor by Hall-based Microsystems, Phys. Electr. Lab. Publ. (ETH) Zurich; ISBN: 3-89649-446-5.
- [11] Roumenin C., Lozanova S., Noykov S., Experimental evidence of magnetically controlled surface current in Hall devices, Sensors and Actuators, A 175, (2012) 45-52.
- [12] Schott C., Popovic R., Integrated 3-D Hall magnetic field sensor, Proc. of Transducers '99, Sendai, Japan, v. 1, 1999, p. 168-171.