

ВЕРТИКАЛЕН МИКРОСЕНЗОР НА ХОЛ

С.В. Лозанова*, М.Л. Ралчев, А.Й. Иванов, Ч.С. Руменин

¹ *Институт по роботика при Българска Академия на Науките
ул. “Акад. Г. Бончев”, бл.2, София 1113, България***Кореспондиращ автор: lozanovasi@abv.bg*

VERTICAL HALL MICROSENSOR

S.V. Lozanova*, M.L. Ralchev, A.J. Ivanov, C. S. Roumenin

*Institute of Robotics at Bulgarian Academy of Sciences
“Acad. G. Bonchev” Str., Bl.2, Sofia 1113, Bulgaria*** Corresponding author: lozanovasi@abv.bg***Abstract**

A novel n-type vertical Hall configuration containing a thin n-type silicon wafer is investigated. Five rectangular ohmic contacts are formed consecutively on one of its main side. The areas of the second and fourth contacts are twice as large as those of the others. The electrodes are fully confined with a p-type ring, and the opposite side is covered with a highly conductive layer. The first and fifth contacts are connected as their common point and the third electrode are the differential output of the microsensor. The new Hall element has increased magnetosensitivity, reaching at room temperature $S \approx 42$ V/AT, the nonlinearity at $B \leq \pm 0.5$ T is $NL \approx 0.4$ %, but in the range $B \leq \pm 1.0$ T the parameter NL does not exceed $NL \leq 1.3$ %. Significant compensation of the parasitic offset is achieved. The lowest value of the detected magnetic field B_{min} i.e. the metrological resolution with a supply of 2mA reaches about 13 μ T due to the increased signal-to-noise ratio and the high conductivity layer. For the first time in this class of vertical Hall devices, a solution is used that increases the symmetry of the structure as well as reducing the offset through an additional fifth contact, high-conductivity layer and p-ring.

Keywords: vertical Hall microsensor, galvanomagnetic operation, sensor characteristics, offset compensation, signal-to-noise ratio.

ВЪВЕДЕНИЕ

Микросензорите за магнитно поле имат нарастваща роля в изследователската и индустриалната сфера. Автоматизацията на процесите, системите с изкуствен интелект, компютърният сектор, роботиката, автомобилостроенето, контртероризмът и други са основен пазар за този клас елементи. Сред множеството приложения, като по-актуални може да се определят следните: безконтактно измерване на тока без разкъсване на проводника; безколектороните DC двигатели; апаратите за високи енергии – плазмотрони, ускорители на елементарни частици и др.; земният магнетизъм,

определяне височината на сателитите, безконтактната автоматика; геофизиката и сеизмологията, електронните компаси и др.; детектиране на линейни и ъглови премествания, сензори за достъп; хибридните превозни средства и електромобилите; навигацията; квантовата комуникация; роботизираната и минимално инвазивната хирургия, включително 3D-телемедицината и лапароскопията; системите за сигурност с елементи на изкуствен интелект; подводните, наземните и въздушните системи за наблюдение и превенция, и др. Всяка от тези групи има своите специфични изисквания, тъй като следва да се измерва раз-

лична по стойност магнитна индукция B , [1-4]. Например, при земния магнетизъм характерната стойност е около $B \sim 0.036$ mT (0.36 gauss), вариациите на земното магнитно поле преди земетресения и изригване на вулкани изискват резолюция от $\Delta B \sim 0.5$ nT, при безконтактната автоматика стойности $B \sim 50 - 60$ mT са напълно достатъчни, докато за системите на ядрената енергетика и колайдерът в ЦЕРН типичното магнитно поле е около $B \sim 2.0 - 4.0$ T. Следователно такъв широк обхват ΔB от стойности на индукцията изисква специализирани сензорни елементи, устройства и инструменти. Практиката показва, че едни от най-универсалните с широк спектър на приложимост са силициевите микросензори на основата на ефекта на Хол. Техният диапазон за детектиране на индукцията B е в обхвата $10^{-8} - 10$ T.

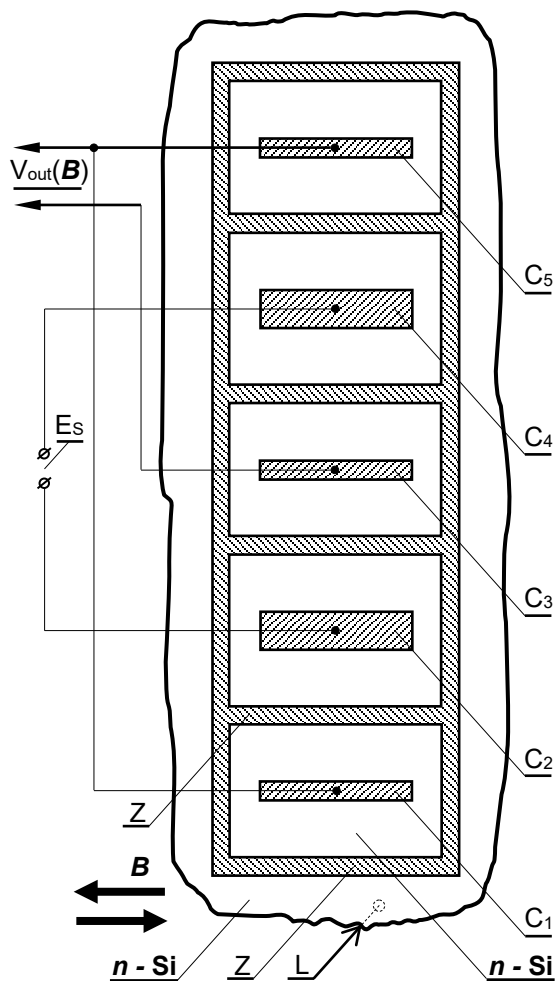
От своето откритие през 1879 г. до 1983 г. конструкцията на тези структури е била непроменена - правоъгълна геометрия с два захранващи на късите страни контакти и два изходни по средите на дългите. Активиращото ги магнитно поле B е перпендикулярно на основната им равнина. Тази топология на сензорите на Хол не е най-подходяща за реализация с планарната микроелектронна технология. През 1983 г. Руменин и Костов създават първите в света вертикални или равнинно-магниточувствителни микросензори на Хол. Първият съдържа само три планарни омични контакти, [5]. Той измерва поле B успоредно на повърхността. Основни предимства на тези необичайни елементи на Хол са пълната им адаптируемост към микроелектронните технологии, възможност за изграждане на интегрални 2D и 3D многомерни векторни магнитометри и др. Максимално опростената конструкция позволява надграждане за конкретните приложения чрез 4, 5, 6 и повече планарни контакти, разширяващи техните

модалности и др., [1,2] Напоследък интерес представлява вертикалният микросензор на Хол с 4 контакти (4C). Той съдържа силициева подложка с n -тип проводимост, върху едната основна повърхност на която са формирани на разстояние един от друг четири омични контакти, разположени успоредно на дългите си страни. Първият и третият електрод са свързани през токоизточник, а вторият и четвъртият са диференциалният изход на микросензора, [1,2,5].

Ограниченията на този вертикален 4C микросензор е ниската магниточувствителност в резултат на паразитния повърхностен ток, шунтиращ захранването. Така се редуцира изходното напрежение на Хол, намалявайки преобразователната ефективност. Освен това е понижена измервателната точност поради високата стойност на офсата (паразитното изходно напрежение в отсъствие на магнитно поле) основно в резултат на асиметрията на контактите и технологията – несъвършенства в легирането, несъосност на маските при фотолитографията, механични напрежения от метализацията и корпусирането на чипа, температурни градиенти, дрейф, флукутации, стареене и др. В настоящата статия е описана нова модификация на вертикален елемент на Хол с повишени сензорни характеристики.

КОНСТРУКЦИЯ, РЕАЛИЗАЦИЯ И МЕТРОЛОГИЯ

а) Новият вертикален микросензор на Хол е представен на Фиг. 1. Усъвършенственият 4C елемент съдържа n -тип Si пластина. Върху едната основна страна са формирани на разстояние един от друг пет правоъгълни омични контакти C_1, C_2, C_3, C_4 и C_5 , разположени успоредно на дългите си страни.



Фиг. 1. Планиметрия на силициевия вертикален микросензор на Хол и схемата на включване

Площите на втория C_2 и четвъртия C_4 контакти са два пъти по-големи от тези на C_1 , C_3 и C_5 . Всеки един от електродите е изцяло ограничен с p -тип ринг Z , проникващ в обема на подложката. Срещуположната страна на тази с електродите съдържа високопроводящ слой L . Контакти C_2 и C_4 са свързани с токоизточник E_S , C_1 и C_5 са съединени като общата им точка и контакт C_3 са диференциалният изход $V_{HC1-C5,C3}(B) \equiv V_{out}(B)$ на микросензора. Измерваното магнитно поле B е успоредно както на равнината на подложката, така и на дългите страни на контактите C_1 , C_2 , C_3 , C_4 и C_5 .

б) Прототипът на елемента на Хол е осъществен с процеси от биполярната IC

технология. Силициевата n -тип подложка е със специфично съпротивление $\rho \approx 7.5 \Omega \cdot \text{cm}$ като концентрацията на донорните атоми N_D и на електроните n_0 е $N_D = n_0 \approx 4.3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Технологичното изпълнение на образците е с четири маски и е описано подробно в [6,7]. Ширината на p -ринга Z на повърхността на подложката е $20 \mu\text{m}$ (по маска). Размерите на отделните части на микросензора (по маска) са както следва: дължината на правоъгълните контакти съставлява $70 \mu\text{m}$; разстоянието между който и да е контакт и p -тип ринга Z е $5 \mu\text{m}$, ширината на контакти C_1 , C_3 и C_5 е $10 \mu\text{m}$, а на захранващите електроди C_2 и C_4 е $20 \mu\text{m}$. Размерите на ефективния обем (пространствената резолюция) се определят от проникването на криволинейната траектория на токоносителите $I_{C2,4}$ в n -Si подложката. При използваната концентрация на електроните n_0 и размерите на контактите проникването е около $25\text{-}30 \mu\text{m}$. В резултат ефективният преобразователен обем V_{eff} на конфигурацията от Фиг. 1 съставлява около $240 \times 120 \times 30 \mu\text{m}^3$ и е подходяща за множество приложения. Микросензорът на Хол може да се реализира също с CMOS, BiCMOS или микромашининг микроелектронни технологии. Високопроводящият слой L се осъществява с метализация или с n^+ - n слой (преход). Изказваме благодарност на проф. О. Паул и екипа му от IMTEK, Фрайбург, Германия за оказаното съдействие.

в) Образците са проектирани за електрични и галваномагнитни измервания. Силициевите чипове са асемблирани върху корпуси тип DIL-22 и DIL-4. Използваният електромагнит е с водно охлаждане и индукция до $B \leq 3.0 \text{ T}$. Той се захранва със стабилизирани източник тип HP 6010A DC. Полето B се калибрира с магнитометър Metrolab – THM 7025. Общата метрологична грешка при тези експерименти е около $\pm 3.0 \%$. Подробна информация за използваните галваномагнитни методи и инструменти се съдържа в [1].

ПРИНЦИП НА ДЕЙСТВИЯ

а) Функционирането на вертикалния микросензор на Хол се основава на нетрадиционната му конструкция. Чрез p -тип ринга Z , целият ток $I_{C2,4}$ прониква в дълбочина на n -Si подложка без разтичане. Рингът не позволява възникването на хоризонтален паразитен компонент от тока $I_{C2,4}$ по повърхността. В предложената конструкция, Фиг. 1, p -рингът Z драстично редуцира и флукуациите на изхода $V_{out}(\mathbf{B})$. Степента на проникване на тока $I_{C2,4}$ зависи освен от p -ринга, но и от ефективното съпротивление R^* на подложката. Стойността на R^* се определя както от концентрацията на електроните, но и от високопроводящия слой L . Траекторията на тока $I_{C2,4}$ в обема на структурата е криволинейна, като произходът ѝ подробно е описан в [1,2]. Дълбочината w при най-често използваната в микроелектрониката концентрация на легиращи примеси в Si, $N_D \approx 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, и разстояние $l_2 \approx 40 \text{ }\mu\text{m}$, w съставлява около 25-30 μm . Близостта на нисколегираната p -зона Z до съответните n^+ -контакти се определя от използваните интегрални технологии. Допълнителният краен контакт C_1 или C_5 , електрически свързан с другия краен електрод изравнява паразитните потенциали в подложката, компенсирайки офсета на изхода V_{out} . Фактически вертикалният елемент от Фиг. 1 е 4С като чрез допълнителния електрод C_5 се отстраняват сензорни недостатъци. Кинетиката на електроните се обуславя и от високопроводящия слой L с плаващ потенциал върху срещуположната страна, Фиг. 1. Понеже p -тип зоната Z пречатства разтичането на хранящия ток по повърхността силно се минимизират и метрологичните грешки и флукуациите на изхода $V_{out}(\mathbf{B})$. Това повишава точността. Предпоставката за по-голямата площ на контакти C_2 и C_4 по отношение на C_1 , C_3 и C_5 е, че при значителна повърхност на електродите C_2 и C_4 Джоуловото нагряване на приповърхностната област от протичащия ток

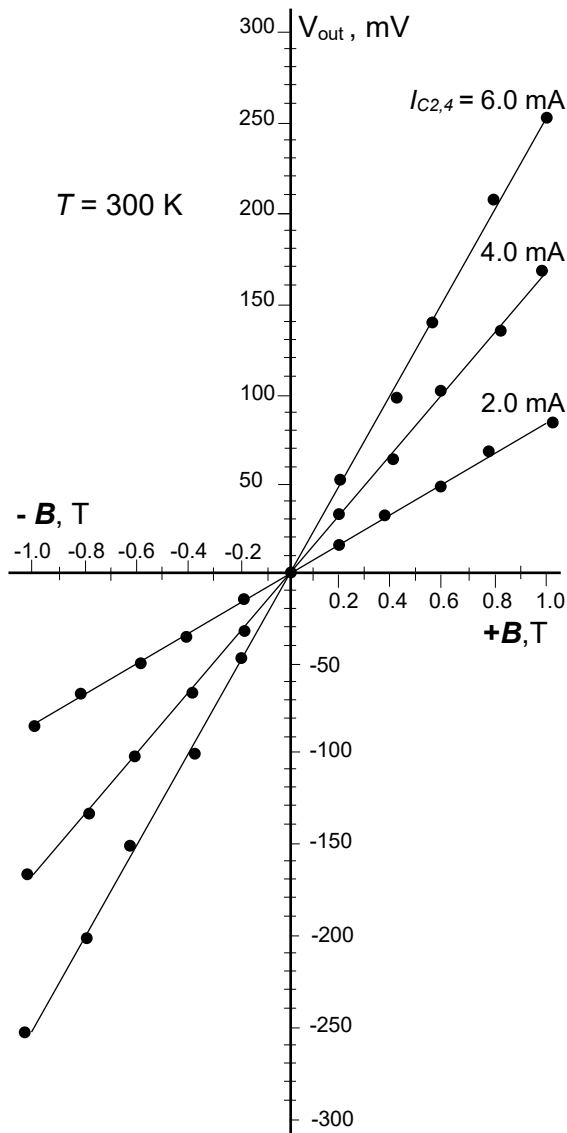
$I_{C2,4}$ е съществено по-ниско. Така се предотвратява евентуалният температурен дрейф и флукуациите.

б) При наличие на външно магнитно поле \mathbf{B} отделните части на нелинейния ток $I_{C2,4}$ са подложени на отклоняващото действие на силите на Лоренц $\pm F_{L,i} = \pm qV_{dr} \times \mathbf{B}$, където q е елементарният товар на електрона, а V_{dr} е векторът на средната дрейфова скорост на токоносителите. По тази причина токовите линии $I_{C2,4}$ се деформират. Това поведение се определя от посоките на полето $\pm \mathbf{B}$ и на тока $\pm I_{C2,4}$, [1,2,4,8,9]. Например, в областта под контакт C_2 силата на Лоренц отклонява електроните в ляво, а в зоната на електрод C_4 в дясно. Между тези контакти токовите линии се отклоняват към дъното на подложката и слоя L . Така генерираните от силите $F_{L,i}$ неравновесни токоносители се акумулират в областите на крайните изходни контакти $C_1 - C_5$ и на средния електрод C_3 . Те се задържат там с ринга Z като се предотвратява разтичането им по повърхността на подложката. Тяхната повишена концентрация, определена от отрицателни товари върху контакти C_1 и C_5 , и положителни върху терминал C_3 , повишава значително изходното напрежение на Хол $V_{out}(\mathbf{B})$. Чрез силите $\pm F_{L,i}$ токовите траектории $I_{C2,4}$ се „разширяват“ към обема или се „свиват“ към горната повърхност на подложката. Фактически вертикалните компоненти I_{C2} и I_{C4} на тока генерират отрицателни потенциали $-V_{C1-C5,C3}(\mathbf{B})$ върху изходните терминали C_1 и C_5 , а върху контакт C_3 токът $I_{C2,4}$ формира положителен потенциал $+V_{C3}(\mathbf{B})$.

Повишената метрологична резолюция на микросензора при детектиране на минималната индукция B_{min} се постига от нарастналото отношение сигнал/шум в резултат на високата чувствителност, редуцираните офсет и шумови флукуации чрез дълбоката p -тип зона Z , плътно обграждаща контактите, и наличието на високопроводящ слой L .

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ

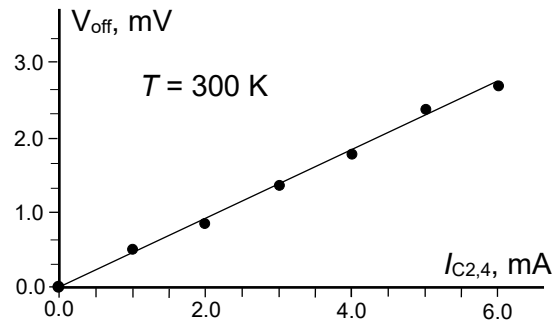
Тук са представени някои от основните сензорни характеристики на елемента на Хол.



Фиг. 2. Изходни характеристики на вертикалния микросензор на Хол при параметър тока $I_{C2,4}$. Офсетът е предварително нулиран. Чувствителността съставлява $S_1 \approx 42 \text{ V/AT}$.

Поведението на изходното му напрежение $V_{out}(B)$ във функция на полето B е показано на Фиг. 2. Относителната магниточувствителност съставляват $S_1 \approx 42 \text{ V/AT}$ и е с около 55 % по-висока от тази на известните 4С елементи. Зависимостите са линейни и нечетни. Нелинейността NL в диапазона $B \leq \pm 0.5 \text{ T}$ дости-

га около $NL \leq 0.4 \%$, а в интервала $B \leq \pm 1.0 \text{ T}$ параметърът NL не надвишава $NL \leq 1.3 \%$. Фигура 3 съдържа зависимостта на офсета V_{off} във функция на захранващия ток $I_{C2,4}$.



Фиг. 3. Зависимост на офсета на микросензора във функция на тока $I_{C2,4}$.

Стойностите му са минимизирани с около 75 % в сравнение с познатия вертикален 4С микросензор. В първо приближение офсетът V_{off} е линейно нарастваща функция от захранването $I_{C2,4}$. При ток 2.0 mA V_{off} съставлява около 0.82 mV, а при 4 mA е $V_{off} \approx 4.0 \text{ mV}$. Този резултат е подходящ за целите на автоматизацията.

Определена е спектрална плътност на шума в диапазона честоти $f \leq 1000 \text{ Hz}$. Тя е от тип $1/f$ (фликер шум). С увеличаване на тока $I_{C2,4}$ нивото на $1/f$ шума нараства също. Най-ниската стойност на детектираното магнитно поле, определена с израза $B_{min} = [S_{NV}(f)\Delta f]^{1/2}$ [1,2] за елемента на Хол при ток $I_{C2,4} = 2.0 \text{ mA}$ в честотния диапазон $f \leq 100 \text{ Hz}$ и отношение сигнал/шум $S/N = 1$, съставлява $B_{min} \approx 13 \mu\text{T}$. Този резултат е подходящ за високоточната магнитометрия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ИЗВОДИ

Предимствата на новото решение са в резултат на специфичната конструкция. С p -ринга целият постъпващ ток прониква без разтичане дълбоко в обема на подложката и формира високата чувствителност. Офсетът е редуциран с допълнителен краен контакт, високопрово-

дящ слой и p -ринг. Наличието на високопроводящ слой намалява ефективното съпротивление на структурата и допринася за проникване в дълбочина на токовите линии. Елементът на Хол е с повишена измервателна точност в резултат на компенсирания офсет и минимизираните паразитни потенциали в подложката. Положителен ефект на конструкцията е, че тя повишава метрологичната резолюция при детектиране на минималната индукция B_{\min} поради увеличеното отношение сигнал/шум. За по-ефективна магнитоелектрична конверсия следва да се използват полупроводниците n -GaAs и n -InSb от групата A^3B^5 , електронната подвижност μ_n на които при $T = 300$ К е драстично по-висока съответно 8 и 65 пъти от тази на електроните в n -Si. За по-съществена преобразователна ефективност за целите на слабополевата и високоточната магнетометрия, сеизмологията, контратероризма, навигацията и др., силициевият чип с конфигурацията от Фиг. 1 може да се разположи между два еднакви концентратора на полето B от ферит или метал. Това решение понижава плътността на магнития поток върху ефективната площ на микросензора, повишавайки изходния сигнал. Несложната конфигурация на новия вертикален микросензор с ефект на Хол е предпоставка за приложимостта му в роботиката, машиностроенето, енергоразпределителните системи и др.

Резултатите са получени в лабораториите на Националния център за компетентност "QUASAR", № BG 16RFPR002-1.014 -0008.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Roumenin C. Solid state magnetic sensors. Amsterdam: Elsevier, 1994.
- [2] Roumenin C. Microsensors for magnetic field, Chap. 9. In MEMS – a practical guide to design, analysis and applications, ed. by J. Korvink and O. Paul. USA: W. Andrew Publ., 2006.
- [3] Foner S. Review of magnetometry. IEEE Trans. Magn. 1981; MAG-17(6): 3358-3363.
- [4] Ramsden E. Hall effect sensors – Theory and application. Netherland: Elsevier, 2006
- [5] Roumenin C, Kostov P. Planar Hall sensor. BG Patent № BG 37208 B1/26.12.1983; Hall sensor. BG Patent № BG 41974 B1/06.05.1986.
- [6] Schott C, Popovic R. Integrated 3D Hall magnetic field sensor. In: Transducers '99, v. 1, 1999, p. 168-171.
- [7] Lozanova S, Ivanov A, Ralchev M, Roumenin C., Double-Hall microsensor, Proc. Intern. Scient. Confer. UNITECH 2023", TU - Gabrovo, vol. I, 2023, pp.187-192.
- [8] Sander C, Vecchi M.-C, Cornils M, Paul O. From three-contact vertical Hall elements to symmetrized vertical Hall sensors with low offset. Sensors and Actuators A 2016; 240 :92-102.
- [9] Lozanova S., Roumenin C. Paralell-field silicon Hall effect microsensors with minimal design complexity. IEEE Sensors Journal, 2009; 9(7): 761-766.