

ДВУКОМПОНЕНТЕН МАГНИТОЧУВСТВИТЕЛЕН СЕНЗОР

TWO-COMPONENT MAGNETOSENSITIVE SENSOR

Сия Лозанова

Институт по системно инженерство и роботика
при Българската Академия на Науките,
София 1113, ПК 79, ул. "Акад. Г. Бончев", Бл. 2,
e-mail: slozanova@icsr.bas.bg

Abstract

A silicon microsensor measuring simultaneously and independently the two in-plane components of the magnetic field is experimentally tested. The structure characterizes with a central ohmic contact and symmetrically to him two perpendicular to each other ohmic contacts. The bottom side of the chip is ohmic contact too. The supply current flows through the central contact and bottom of the chip. Output voltages are generated on the perpendicular couple contacts due to the Hall effect and in arbitrary direction of the magnetic field. The silicon substrate serves as an active transducer zone. The magnetosensitivities of the two sensor channels are equal reaching $S = 25 \text{ V/AT}$ at $T = 300 \text{ K}$ and $S = 120 \text{ V/AT}$ at $T = 77 \text{ K}$. The channel cross-sensitivity do not exceeds 5 % as the internal noise is 1/f type. The simplified device design and the performance of this 2D microsensor are especially suitable in systems engineering and bioengineering too.

Keywords: multisensing, Hall effect device, 2D magnetometry, magnetic-field transducers

ВЪВЕДЕНИЕ

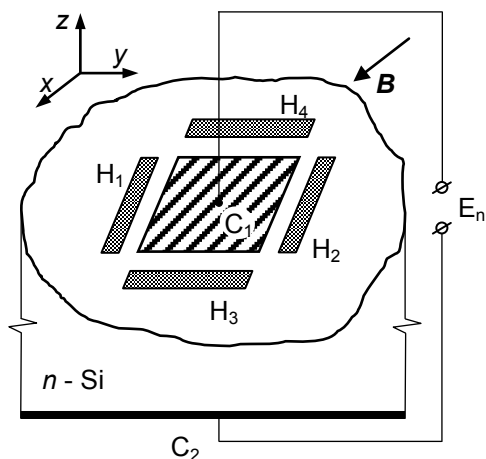
Многомерната (2D и 3D) магнитометрия, осъществявана с една и съща полупроводникова микроструктура е един от най-актуалните проблеми на сензориката и микро-системите. Такъв подход предоставя предимства, които са недостижими с останалите методи и технологии като изключително висока разделителна способност (възможност за регистрация на магнитното поле B_x , B_y или B_z в "точка"), съществено подобрена ортогоналност при измерването на отделните компоненти по осите x , y и z в резултат прецизността на силициевата планарна технология, положението на векторния магнитометър по отношение на източника на магнитното поле не е критично (особено за 3D микросензорите) както при 1D преобразувателите, оптимална електрическа, топлинна и технологична съвместимост на отделните сензорни канали и др., [1-3]. До сега са създадени множество мултидименсионални магнитни сензори и микросистеми с

многофункционално предназначение, използващи различни изтънчени силициеви технологични процеси. Принципът им на действие са ефектът на Хол, включително неговата паралелно-магнитополева проява, магнитодиодният и магнитотранзисторният ефект и др., [1-9]. Съществуват множество приложения, когато е целесъобразно хибридно или дискретно реализиране на векторните магнитометрични системи. Такива са случаите за използване на 2D микросензорите в изследването на биосистемите, автоматизацията на опасни за човешкото здраве производствени процеси, безконтактното измерване на ел. ток и енергия, и др. В настоящата статия е описан и тестван двукомпонентен магниточувствителен сензор, използващ стандартна планарна силициева технология, функциониращ на основата на паралелно-магнитополевия ефект на Хол и измерващ двете равнинни компоненти на полето B_x и B_y . Предпоставка за реализирането му е проект, в рамките на който е необходимо изследване влиянието на магнит-

ното поле върху свойствата на биоетанола като гориво за двигателите с вътрешно горене.

ОПИСАНИЕ И ПРИНЦИП НА ФУНКЦИОНИРАНЕ НА 2D МАГНИТНИЯ СЕНЗОР

На фиг. 1 схематично е показана приборната конструкция на двукомпонентния магниточувствителен елемент.



Фиг. 1. Двукомпонентен силициев магнитометър

Структурата съдържа *n*-тип силициева подложка, върху горната страна на която е формиран централен омичен контакт C_1 с квадратна форма. Симетрично на него са разположени по два взаимно перпендикулярни омични контакти H_1 - H_2 и съответно H_3 - H_4 , всичките с правоъгълна форма. Долната страна на силициевия чип е също омичен електрод C_2 . По същество 2D векторният магнитометър съдържа два функционално интегрирани 1D силициеви микросензори на Хол с паралелна ос на магниточувствителност C_1 - C_2 - H_1 - H_2 и C_1 - C_2 - H_3 - H_4 , подобни на описаните в [1,2,9,10]. През контакти C_1 и C_2 се пропуска захранващия ток $I_s \equiv I_{C1,2}$ от източника E_n . Външното магнитно поле $\mathbf{B}(\mathbf{B}_x, \mathbf{B}_y)$ е с произволна ориентация и лежи в равнината x - y на силициевата подложка.

Действието на този двукомпонентен векторен микросензор е на основата на паралелно-магнитополевия ефект на Хол, открит през 1983 г. от Руменин и Костов, [11]. В конкретния случай неговата проява е

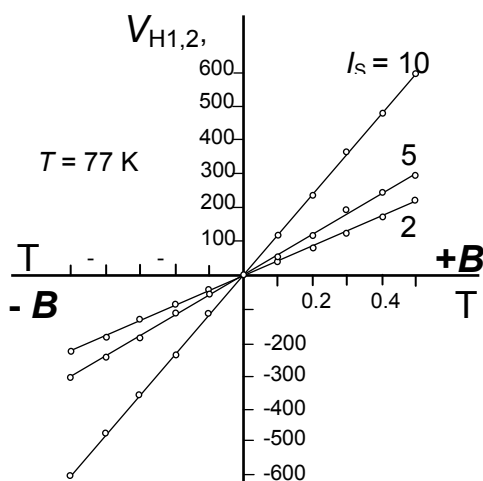
следната. В резултат на структурната и електрическата симетрия на елемента от фиг. 1, в първо приближение разпределението на токовите линии в обема на силициевата подложка е симетрично спрямо линията, свързваща центъра на контакт C_1 и срещуположно разположената точка върху контакт C_2 . По тази причина неминуемото напрежение на несиметрия (офсет) върху изходните контакти H_1 - H_2 и съответно H_3 - H_4 е минимално, $V_{H1,2} \approx V_{H3,4} \approx 0$. Ако се приложи външно магнитно поле $\mathbf{B}_x$ перпендикулярно на контакти H_3 и H_4 , т.е. по оста x , силата на Лоренц $\mathbf{F}_L = q \cdot \mathbf{V}_z \times \mathbf{B}_x$ отклонява странично, в посока на оста y , движейщите се с дрейфова скорост $\mathbf{V}_z$ основни токоносители (електрони). В зависимост от взаимните ориентации на скоростта $\mathbf{V}_z$ и полето $\mathbf{B}_x$, върху горната повърхност на чипа, в областите където са разположени контакти H_1 и H_2 възникват допълнителни електрически товари и с противоположен знак, компенсиращи Лоренцовата дефлексия, поле на Хол $E_{H1,2}$ и респективно напрежение на Хол $V_{H1,2}(\mathbf{B}_x)$. Аналогична е ситуацията ако се приложи външно магнитно поле $\mathbf{B}_y$ по оста y . Тогава Холовият сигнал $V_{H3,4}(\mathbf{B}_y)$ се генерира между контакти H_3 и H_4 . Когато посоката на вектор $\mathbf{B}$ е произволна в равнината x - y , двете компоненти $\mathbf{B}_x$ и $\mathbf{B}_y$ създават две отделни Холови въздействия, обуславящи двата сензорни канала $V_{H1,2}(\mathbf{B}_x)$ и $V_{H3,4}(\mathbf{B}_y)$. Изходните напрежения са мярка за стойностите на двете векторни компоненти $\mathbf{B}_x$ и $\mathbf{B}_y$ на магнитното поле $\mathbf{B}$. В това се заключава едновременно и независимо измерване на равнинните магнитни компоненти на вектора $\mathbf{B}$. Абсолютната стойност на вектора $\mathbf{B}$ се дава с добре известния израз $|\mathbf{B}| = (\mathbf{B}_x^2 + \mathbf{B}_y^2)^{1/2}$, а ъгълът θ между оста x и посоката на полето $\mathbf{B}$ - с формулата $\theta = \tan^{-1}(\mathbf{B}_y/\mathbf{B}_x)$, [1]. Интеграцията на измервателните функции за x и y компонентите на полето $\mathbf{B}$ е резултат от факта, че обемът на самата силициева подложка изпълнява ролята на активна сензорна зона и двете прояви на паралелно-магнитополевия ефект на Хол интерферират.

Тестваните прототипи на описания двукомпонентен магниточувствителен сензор са реализирани върху *n*-Si подложка със специфично съпротивление $\rho = 7.5 \Omega \cdot \text{cm}$ т.е.

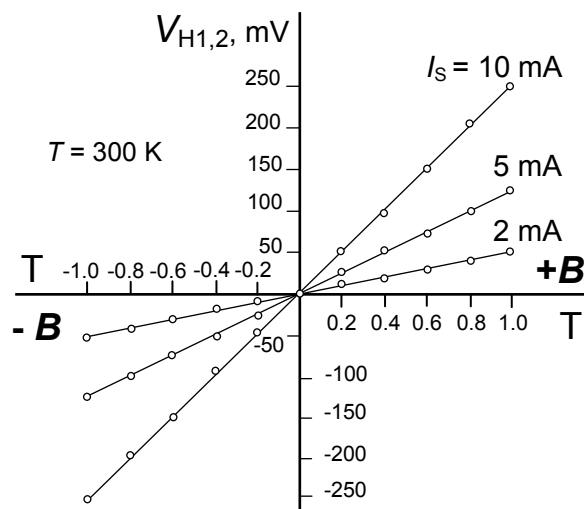
с концентрация на електроните $n = N_D = 4.3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Омичните контакти $C_1, H_1 \dots H_4$ са осъществени чрез силно легираните n^+ области, които са с концентрация 10^{20} cm^{-3} . Оптимизираният вариант на 2D векторния микросензор, реализиран със стандартна планарна технология е с размери $l_{C1-H1} = l_{C1-H2} = l_{C1-H3} = l_{C1-H4} = 40 \text{ }\mu\text{m}$ като дебелината на подложката е $\sim 300 \text{ }\mu\text{m}$. Размерите на контакт C_1 са $50 \times 50 \text{ }\mu\text{m}^2$, а дължините на правоъгълните контакти $H_1 \dots H_4$ са $20 \text{ }\mu\text{m}$. Силициевият чип е фиксиран неподвижно към немагнитна носеща лента с проводящо епоксидно лепило и така е формиран вторият омичен контакт C_2 . Захранващият ток е в диапазона $I_{C1,2} \leq 12 \text{ mA}$. Експериментите са осъществени при температури $T = 300 \text{ K}$ и $T = 77 \text{ K}$. Изследванията при температурата на кипене на течния азот $T = 77 \text{ K}$ са проведени в подходящ за галваномангнитни измервания криостат. Образците се монтират на държател от немагнитен материал, позволяващ ъглови измервания. Хомогенното магнитно поле с индукция $B \leq 2 \text{ T}$ се създава от електромагнит с водно охлаждане от тип на Вейс.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ

На фиг. 2 и фиг. 3 са представени изходните характеристики $V_{H1,2}(B_x)$ за един от сензорните канали на 2D магнитометъра при $T = 300 \text{ K}$ и $T = 77 \text{ K}$, $B_x \equiv B$. Констатира се линейно и нечетно управление на изходите на елемента като преобразователната му ефективност нараства около 5 пъти при $T = 77 \text{ K}$.

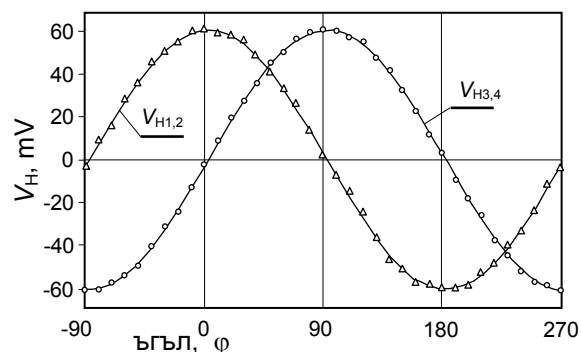


Фиг. 2. Изходни характеристики на 2D микросензора на Хол при параметър захранващия ток I_s при стайна температура



Фиг. 3. Изходни характеристики на 2D микросензора на Хол при параметър захранващия ток I_s при азотна температура

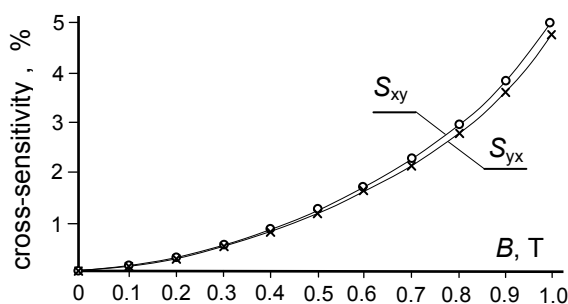
Това е свързано с около петкратното увеличаване на подвижността μ_n на електроните, [12]. Нелинейността на двата канала съставлява 1-2 % в интервала $B < 1.0 \text{ T}$. Магниточувствителността на отделните изходи е една и съща и е $S = 25 \text{ V/AT}$ при $T = 300 \text{ K}$ и $S = 120 \text{ V/AT}$ при $T = 77 \text{ K}$. На Фиг. 4 е показана ъгловата зависимост на Холовите напрежения $V_{H1,2}(\varphi)$ и $V_{H3,4}(\varphi)$ при ротация на микросензора в равнината x - y около оста z .



Фиг. 4. Ъглова диаграма на двата сензорни канала $V_{H1,2}$ и $V_{H3,4}$ при $T = 300 \text{ K}$, $B = 0.25 \text{ T}$ и $I_s = 10 \text{ mA}$

Синусното и косинусното поведение на изходите е експериментален факт, което е очакван потвърдителен резултат. Темпера-

турната зависимост на чувствителността е $T.C. = 0.1 \text{ \%}/^\circ\text{C}$. Спектралната плътност на шума в двата канала в интервала $1 \leq f \leq 1000 \text{ Hz}$ е $1/f$. На Фиг. 5 е представена паразитната междуканална чувствителност $C.S.$ на двукомпонентния магниточувствителен сензор, основният параметър в полупроводниковата мултидименсионална магнитометрия.



Фиг. 5. Междуканална паразитна магниточувствителност $C.S.$ на 2D магнитометъра.

Съгласно получените резултати при индукция $B = 1 \text{ T}$ $C.S.$ достига около 5 %. Това се обяснява с факта, че в нашия случай не е осъществено специално ограничаване на зоните между планарните контакти $C_1, H_1 \dots H_4$, където се генерират допълнителните товари от ефекта на Хол. Изходите на 2D векторния микросензор регистрират променливо магнитно поле без изменение на амплитудата и фазата на изходния сигнал до $f < 40 \text{ kHz}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Създаденият двукомпонентен магниточувствителен сензор е с максимално опростена конструкция и е реализиран като дискретен елемент. Неговият перформанс и преди всичко ниското ниво на собствен шум, високата магниточувствителност, твърде широкият работен температурен диапазон определят универсалната му приложимост. В нашия случай новият 2D магнитометър е подходящ за изследване влиянието на магнитното поле за подобряване горивните качества на биоетанола в автомобилните двигатели.

Изказвам благодарност на проф. д-р Б. Корта от TIMA Lab., Гренобъл за оказаната всеотдайна помощ и съдействие.

Изследването е осъществено и в рамките на проект № ДТК – 02/27/17.12.2009 г. на МОН

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ch.S. Roumenin, Solid State Magnetic Sensors, Amsterdam, Elsevier, 1994.
- [2] Ch.S. Roumenin, Microsensors for magnetic fields, in "MEMS – a practical guide to design, analysis and applications", Norwich, USA, W. Andrew Publ., 2006, pp. 453-521.
- [3] Ch. Roumenin, D. Nikolov, I. Ivanov, Amperometric circuit for high accuracy 2D and 3D magnetic-field measurement, Meas. Sci., Technol., 14 (2003) 851-857.
- [4] A. Haberli, M. Schneider, P. Malcovati, R. Castagnetti, F. Maloberti, H. Baltes, Two-dimensional magnetic microsensor with on-chip signal processing for contactless angle measurement, IEEE J. Solid-State Circuits, 31 (1996) 1902-1907.
- [5] C. Schott, P. Burger, H. Blanchard, L. Chiesi, Modern integrated silicon Hall sensors, Sensors Rev., 18 (1998) 252-257.
- [6] C. Schott, R. Popovic, Integrated 3D Hall magnetic field sensor, Transducers '99, Sendai 1999, v. 1, pp. 168-171.
- [7] C. Roumenin, 2D magnetodiode sensor based on SOS technology, Sens. Actuators, A 54 (1996) 584-588.
- [8] F. Burger, P. Besse, R. Popovic, New fully integrated 3D silicon Hall sensor for precise angular-position measurement, Sens. Actuators, A 67 (1998) 72-76.
- [9] C. Roumenin, Parallel-field Hall microsensor – an overview, Sens. Actuators, A 30 (1992) 77-87.
- [10] С.В. Лозанова, Триконтактни силициеви сензори на Хол с паралелна ос на чувствителност, Автореферат на PhD дисертация, София, 2006 г., стр. 40.
- [11] Ч.С. Руменин, П.Т. Костов, Планарен датчик на Хол, Авт. свид. No 37208/26.12.1983; Планарен магнителектричен преобразувател, Годишник на ВУЗ (Техническа физика), 21(2) (1984) 73-82; Tripole Hall sensor, C.R. BAS, 38(9) (1985) 1145-1148.
- [12] F.J. Morin, J.P. Maita, Electrical properties of silicon doped with As and B, Phys. Rev. 96(1) (1954) 28-39.