

2D СИЛИЦИЕВ МИКРОСЕНЗОР НА ХОЛ

2D SILICON HALL MICROSENSOR

С. Лозанова, А. Иванов, Ч. Руменин

*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 2D silicon Hall microsensor measuring simultaneously and independently two magnetic field components is realized and tested. The first component is in the plane and the other one is orthogonal to this plane. On the upper side of n-type substrate a deep rectangular p-ring with dimensions 50 x 150 μm and depth 10 μm is realized. In the surrounded by the p-ring n-region, near to one of its short sides and parallel to it, two ohmic contacts are formed. On the opposite side of the n-zone there is a third ohmic contact. In the middle part of the rectangular n-region two equal ohmic contacts parallel to the long sides of the ring also exist. The two contacts on wide side of the ring via respective load resistors and supply are fed with the third ohmic contact. The channel outputs for the two magnetic components are the two contacts connected to the resistors and the electrode parallel to the long side of the ring respectively. The 2D Hall microsensor is working as at $T = 300\text{K}$ and $T = 77\text{K}$.

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

ВЪВЕДЕНИЕ

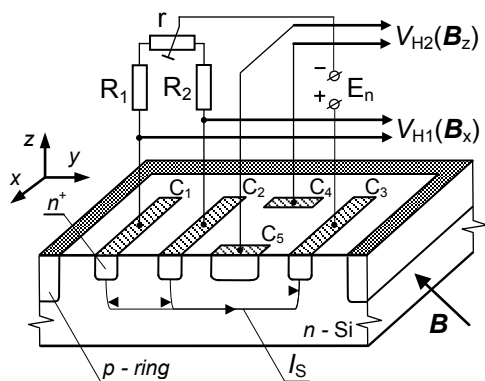
Интеграцията на повече от една измервателна функция в преобразувателната област на полупроводниковите сензори, използвайки добре дефинирани и еднозначни физически ефекти и механизми е ново направление в сензориката, микросистемите и наноелектрониката. Такова добре дефинирано явление, например, е ефектът на Хол в двете си прояви - ортогоналната и паралелно-магнитополевата. В първия случай при едновременното действие на захранващ ток I_s през полупроводниковите структури и ортогонално на тяхната равнина външно магнитно поле B върху двете срещуположни страни на характерните за проявата на този механизъм паралелепипедни образци се генерира напрежение на Хол. Тази конфигурация и съответният физически ефект са открити от Е. Хол през 1879 г. Те са в основата на класическите ортогонални сензори на Хол, разпространени масово в системното инженерство, роботиката, енерге-

тиката, автоматиката, космическите изследвания и др. През 1983 г. Руменин и Костов доказаха за първи път експериментално, че ефектът на Хол може да съществува и когато магнитното поле е успоредно на равнината на проводящите материали, в това число полупроводниковите структури. При тази необичайна конфигурация всички контакти - захранващи и регистриращи са планарни. Това драстично опростява технологичната реализация на този тип преобразуватели на магнитно поле с методите на силициевата интегрална технология. Обект на настоящото изследване е силициев микросензор на Хол, функционално обединяващ тези две прояви на ефекта на Хол и измерващ едновременно и независимо компонентите B_x и B_z на вектора на магнитното поле B .

КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИП НА ДЕЙСТВИЕ НА 2D МАГНИТОМЕТЪРА

Новият двукомпонентен елемент на Хол е представен на Фиг. 1. Силициевата под-

ложката е с n -тип проводимост като върху горната ѝ страна е формиран дълбок p -ринг с правоъгълна форма.



Фиг. 1. Двуконпонентен магниточувствителен елемент на Хол

В n -тип зоната, която е заобиколена от p -ринга, близо до една от късите ѝ страни и успоредно на нея са разположени на разстояние един от друг два n^+ омични контакта C_1 и C_2 . На срещуположния край на тази зона има трети n^+ омичен контакт C_3 , също успореден на късата страна на p -ринга. В средната част на правоъгълната n -тип зона са формирани още два еднакви n^+ омични контакти C_4 и C_5 , успоредни на дългите страни на ринга. Двата контакта C_1 и C_2 през еднакви по стойност товарни резистори R_1 и R_2 и токоизточник E_n са свързани със срещуположния им омичен контакт C_3 . Изходите $V_{H1}(B_x)$ и $V_{H2}(B_z)$ за двете магнитни компоненти B_x и B_z са контактите C_1 и C_2 и съответно тези, успоредни на дългите страни на ринга C_4 и C_5 . В нашия случай активната n -тип преобразователна област е ограничена странично от изолиращия p -ринг, а долната страна на сензора е открита към подложката, аналогично на ортогоналния елемент на Хол, описан в [8]. Използването на дълбок p - n изолиращ преход, формиращ ринга осъществява частично отделяне на микросензора от останалата част на силициевата n -подложка.

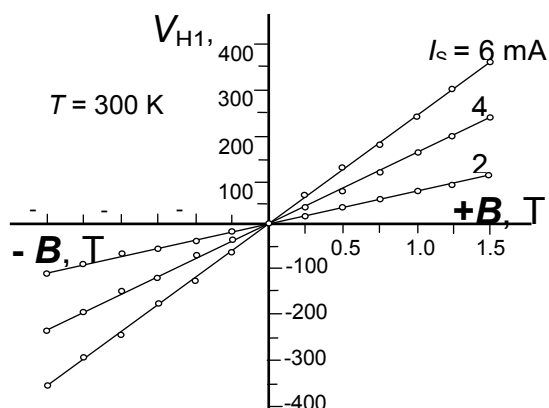
Действието на 2D силициевия микросензор се основава на ортогоналната и паралелно-магнитополевата проява на ефекта на Хол. Протичането на захранващия ток I_s през контакти C_1 , C_2 и C_3 в горната част на чипа е ограничено от p -ринга. В резултат от екипотенциалността на силно легираните

n^+ -контакти, първоначално токовите линии I_{C1} и I_{C2} проникват вертикално надолу в n -подложката, след което траекторията на тока I_s става успоредна на горната повърхност на структурата, $I_{C1} + I_{C2} = I_{C3} \equiv I_s$. Ако се приложи външно магнитно поле B_x , перпендикулярно на напречното сечение на елемента от Фиг. 1 възниква странично отклонение по оста y на компонентите I_{C1} и I_{C2} от силата на Лоренц $F_L = qV_{dr,z} \times B_x$. Ето защо в зоните, където са разположени контакти C_1 и C_2 се генерират допълнителни електрически товари с противоположен знак и възниква поле и напрежение на Хол. Този сензорен механизъм може експериментално да се установи при наличието на двата еднакви по стойност резистори $R_1 = R_2$, включени към контакти C_1 и C_2 , [7]. Следователно чрез изходния канал $V_{H1}(B_x)$ се измерва лежащата в равнината на силициевата подложка магнитна компонента B_x . Ако се приложи ортогонално на равнината на структурата от Фиг. 1 магнитно поле B_z , силата на Лоренц $F_L = qV_{dr,y} \times B_z$, въздействайки върху успоредния на горната страна на чипа захранващ ток I_s , генерира върху успоредните на p -ринга омични контакти C_4 и C_5 класическия ефект на Хол. Напрежението $V_{H2}(B_z)$ представлява B_z сензорният канал, измерващ ортогоналната магнитна компонента B_z . Когато посоката на магнитното поле B е произволна в равнината y - z , двете компоненти B_x и B_z се регистрират с изходите V_{H1} и V_{H2} , $B_x + B_z = B$. От анализа се вижда, че в активната преобразователна зона на 2D силициевия микросензор функционално са интегрирани две прояви на ефекта на Хол. В резултат на изходите на елемента се получава едновременно и независимо метрологична информация за компонентите B_x и B_z на вектора на магнитното поле B . Абсолютната стойност на вектора B се дава с известния израз. $|B| = (B_x^2 + B_z^2)^{1/2}$, а ъгълът Θ между оста x и посоката на полето B - с формулата $\Theta = \tan^{-1}(B_z/B_x)$, [1].

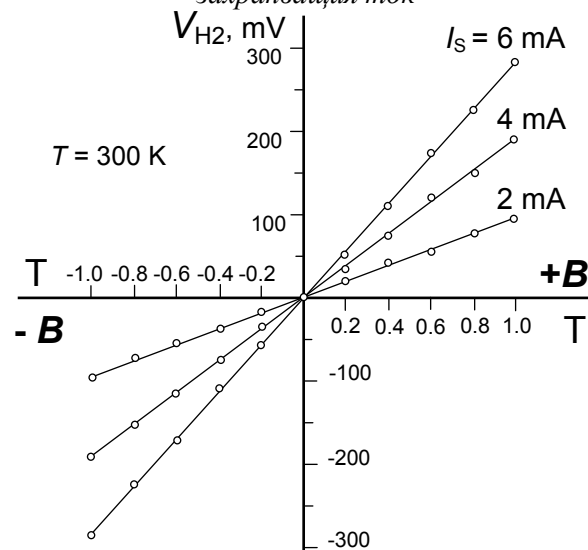
РЕАЛИЗАЦИЯ И ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ

а) Изследваните образци на 2D микро-сензора на Хол от Фиг. 1 са реализирани със силициева планарна технология върху n -Si подложка със специфично съпротивление $\rho = 7.5 \Omega \cdot \text{cm}$, т.е. с концентрация на основните токоносители $n = 4.3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Омичните контакти C_1, C_2, C_3, C_4 и C_5 са осъществени чрез силно легирани n^+ области с концентрация $N_D \sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$. Повърхностните размери на активната сензорна област, ограничена от изолиращия p -ринг са $50 \times 150 \mu\text{m}$ като дълбочината му е $t_{\text{eff}} \approx 10 \mu\text{m}$. Силициевият чип е фиксиран неподвижно към немагнитна носеща лента с епоксидно лепило. Експериментите са проведени при температури $T = 300 \text{ K}$ и $T = 77 \text{ K}$ като изследванията при течния азот $T = 77 \text{ K}$ са осъществени в подходящ криостат за галваномангнитни измервания. Образците се монтират върху немагнитен държател, позволяващ и ъглови измервания. Хомогенното магнитно поле с индукция $B \leq 2 \text{ T}$ се създава от електромагнит с водно охлаждане от тип на Вейс. Спектралната плътност на шума е определена с цифров спектрален анализатор тип Philips PM 3360. Допълнителна информация за експерименталната постановка и използваната апаратура се съдържа в [9].

б) На Фиг. 2 и Фиг. 3 са представени изходните характеристики $V_{H1}(B_x)$ и $V_{H2}(B_z)$ при стайна температура $T = 300 \text{ K}$. Магниточувствителностите на B_x и B_z каналите съставлява $S_x(300 \text{ K}) = 43 \text{ V/AT}$ и $S_z = 48 \text{ V/AT}$. При температурата на течния азот $T = 77 \text{ K}$ характерът на зависимостите са напълно запазва като чувствителностите са съответно $S_x(77 \text{ K}) = 208 \text{ V/AT}$ и $S_z(77 \text{ K}) = 231 \text{ V/AT}$. Поведението на характеристиките е типично за ефекта на Хол - те са линейни и нечетни от магнитното поле и хранващия ток.

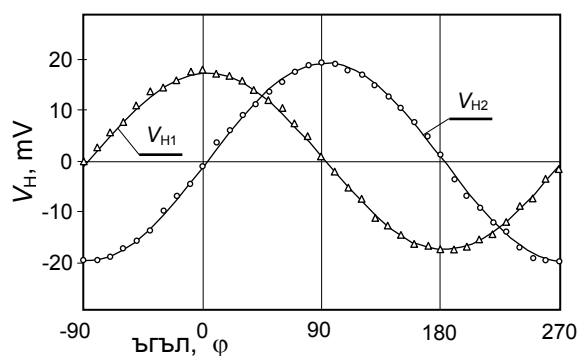


Фиг. 2. Изходни характеристики за B_x – канала на 2D магнитометъра, при параметър хранващия ток



Фиг. 3. Изходни характеристики за B_z – канала на 2D магнитометъра, при параметър хранващия ток I_s

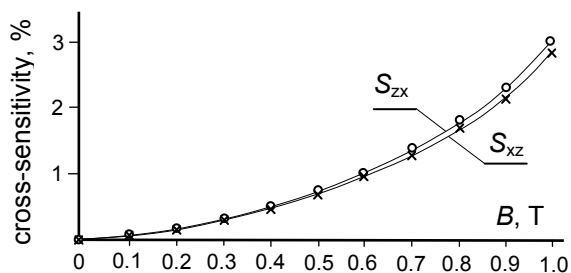
Преобразователната ефективност нараства около 5 пъти при $T = 77 \text{ K}$ в резултат на петкратното увеличаване на подвижността μ_n на електроните при $T = 77 \text{ K}$, [10]. Нелинейността на двата канала е 1-2 % в интервала $B \leq 1.0 \text{ T}$. На Фиг. 4 е показана ъгловата диаграма на Холовите напрежения $V_{H1}(\phi)$ и $V_{H2}(\phi)$ при ротация на микро-сензора в равнината x - z около оста y .



Фиг. 4. Ъглова зависимост на двата изхода $V_{H1}(B_x)$ и $V_{H2}(B_z)$ на 2D магнитометъра при ротация около оста y , $B = 0.2 \text{ T}$, $I_s = 2 \text{ mA}$ и $T = 300 \text{ K}$

Наблюдава се синус и косинус зависимости на двата канални изхода, което е потвърдителен за тази експериментална по-

становка факт. Температурното поведение на чувствителността е $T.C. = 0.1 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$. Проведените експерименти показват, че спектралната плътност на шума на двата изхода $V_{H1}(0)$ и $V_{H2}(0)$ в интервала $1 \leq f \leq 1000 \text{ Hz}$ е от тип $1/f$. На Фиг. 5 е представена паразитната междуканална чувствителност $C.S.$, т.е. негативното взаимно влияние между двата сензорни канала на 2D силициевия микросензор на Хол.



Фиг. 5. Паразитната канална магниточувствителност $C.S.$ във функция на индукцията B

При индукция $B = 1 \text{ T}$ параметърът $C.S.$ достига около 3 %. Този резултат, сравнен за подобни двукомпонентни магнитометри е нисък в резултат на ограничената активна сензорна зона с дълбокия p - n преход на ринга. Установено е, че изходите на 2D векторния микросензор регистрират променливо магнитно поле без промяна на амплитудата и фазата на изходния сигнал до $f < 40 \text{ kHz}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Тестваният 2D силициев микросензор на Хол е с подходящ перформанс за множество практически приложения. Показателно е действието му при криогенни температури, което сериозно разширява технико-експлоатационните му възможности. Високата в рамките на използваната технологична реализация магниточувствителност е в резултат на откритата към обема на подложката долна страна на елемента на Хол. Това обезпечава обемната, а не повърхностната стойност на подвижността на електроните, която в n -Si съставлява $\mu_n \approx 1200 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. Също така ограничителният p -ринг минимизира повърхностното разтичане на хранящия ток и допринася за повишаване на

чувствителността. Постигнатите метрологични характеристики на новия 2D векторен микросензор са особено подходящи в областта на системното инженерство, включително биоинженерството за изследване възможността за повишаване ефективността на биоетанола като автомобилно гориво при третирането му с магнитно поле.

Изказваме благодарност на проф. д-р Б. Корта от TIMA Lab., Гренобъл за оказаната ни всестранна помощ.

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

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] Ч.С. Руменин, П.Т. Костов, Планарен датчик на Хол, Авт. свид. No 37208/26.12.1983.
- [4] C. Schott, P. Burger, H. Blanchard, L. Chiesi, Modern integrated silicon Hall sensors, Sensors Rev., 18 (1998) 252-257.
- [5] 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. Solide-state circuits, 31 (1996) 1902-1907.
- [6] C. Roumenin, Parallel-field Hall microsensor - an overview, Sens. Actuators, A 30 (1992) 77-87.
- [7] S. Lozanova, C. Roumenin, A novel parallel-field double-Hall microsensor with self-reduced offset and temperature drift, Proc. of the Eurosensors XXIV Conf., Sept. 5-8, Linz, Austria, 2010.
- [8] Z. Randjelovic, Y. Haddab, A. Panchard, R. Popovic, A novel non-plate like Hall sensor, Proc. of the Eurosensors XII Conf., 1998, pp.971-974.
- [9] С.В. Лозанова, Триконтактни силициеви сензори на Хол с паралелна ос на чувствителност, Автореферат на PhD дисертация, София, 2006 г., стр. 40.
- [10] F.J. Morin, J.P. Maita, Electrical properties of silicon doped with As and B, Phys. Rev. 96(1) (1954) 28-39.