

СДВОЕН МИКРОСЕНЗОР НА ХОЛ**С.В. Лозанова¹, А.Й. Иванов¹, М.Л. Ралчев¹, Ч.С. Руменин¹**

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

DOUBLE-HALL MICROSENSOR**S.V. Lozanova¹, A.J. Ivanov¹, M.L. Ralchev¹, C. S. Roumenin¹**

¹ *Institute of Robotics at Bulgarian Academy of Sciences
“Acad. G. Bonchev” Str., Bl.2, Sofia 1113, Bulgaria
E-mail: lozanovasi@abv.bg*

Abstract

In this paper, a novel microsensor configuration representing a double-Hall device is investigated. It contains a thin n-type silicon substrate with a parallelepiped shape. On its two long side, four pairs of ohmic contacts, first and second, third and fourth, fifth and sixth, seventh and eighth, respectively, are formed spaced and symmetrically opposite each other. The contacts with even numbers are on one side and with odd numbers on the other. The first and fifth contacts are fed to the power supply in current mode of operation. The first and fourth, and respectively the fifth and eighth contacts are connected. The second and third, and respectively the sixth and seventh contacts are coupled, too. The differential output of the new microsensor are the second and sixth contacts. The external magnetic field is perpendicular to the plane of the substrate. The sensitivity of the double-Hall devicer is 27 V/AT, the nonlinearity at $B \leq \pm 0.5$ T is $NL \approx 0.3\%$, and at $B \leq \pm 1.0$ T it is 1.1%. Significant minimization of the parasitic output offset is achieved. The lowest value of the detected magnetic field with a supply current of 2 mA reaches about 12 μ T.

Key words: Hall effect; vertical Hall device; double-Hall configuration; offset reduction, sensor characteristics.

ВЪВЕДЕНИЕ

В сензориката на магнитното поле един от сериозните проблеми е съществуването в полупроводниковите елементи на Хол на паразитно изходно напрежение в отсъствие на магнитно поле, известно още като офсет. Този недостатък сериозно ограничава измервателната точност, особено в слабополевата магнетометрия за целите на геофизиката, навигацията, безконтактната автоматика и медицината. Основна причина за офсата е съществуващата структурна асиметрия на входните и изходните контакти спрямо токовите линии на захранващия ток в подложката. Друга група причини е технологична – несъвършенства в легирането, несъосност на маските при фотолито-

графията, механични напрежения от метализацията и корпусирането на чипа, пиезосъпротивлението, температурни градиенти и флуктуации, стареене и др. Всичко това води до негативните офсет-напрежения на диференциалните изходи. За преодоляване на този недостатък съществуват няколко основни способа. Първият е ортогоналното свързване на два дискретни и идентични сензора на Хол, [1, 2]. Решението се основава на равенство на чувствителностите на двете пластини и противоположни знаци на двете офсет-напрежения. В резултат паразитният сигнал на изхода следва да се минимизира. На практика обаче този метод е силно ограничен от необходимостта за пълно електрично и технологично

съгласуване, включително и на физическите свойства на преобразователните зони на двете Хол структури. Такава идентичност дори с интегралните микроелектронни процеси е почти нереализируема. Освен това не винаги офсетите са с противоположен знак. Друг подход за редуциране на офсета са различните динамични техники. Една от най-разпространените е токовият спининг, [2-6]. Основната идея е измерване и запомняне на изходните напрежения на мултиконтактен елемент на Хол, най-често с ротационна симетрия, при последователно редуващи се диаметрални посоки на захранващия ток. Усреднявайки изходните сигнали от този спининг за един пълен период от 360° се осъществява почти пълно компенсиране на офсета, а често пъти и собствения шум. Въпреки своята атрактивност, недостатъците са два. Единият е ограниченият обхват на честотите за превключване на токовете режими (токовия спининг), свързан с размерите на ротационния образец. Другият е усложнената аналогова схематехника, изискваща високоточен и надежден модул *sample and hold*. Освен това този спининг-метод трудно се съотнася с ясни и несложен като механизъм на действие ефект на Хол, [3-5].

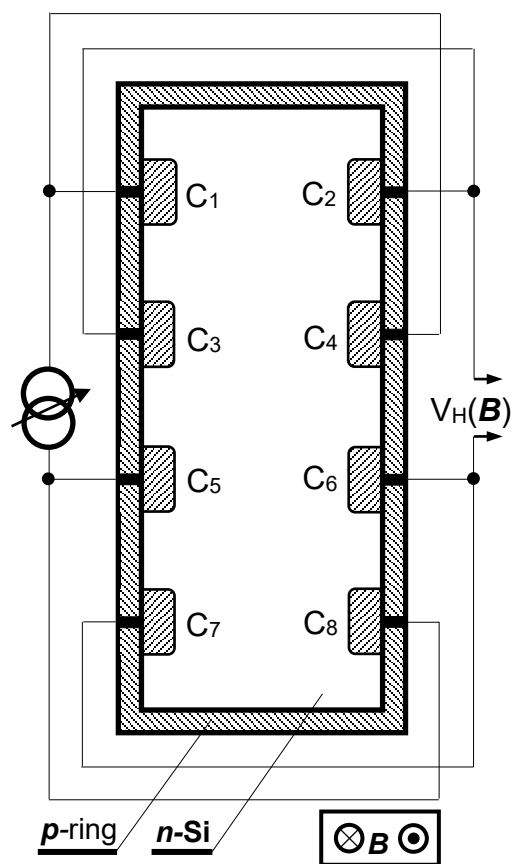
Неотдавна за неутрализиране на офсета получи разпространение метода на сдвоения сензор на Хол. Това е силициева конфигурация, съдържаща два елемента на Хол, функционално интегрирани в една и съща активна област на чипа. Информационният сигнал се получава като разлика на двете изходни напрежения. Двата елемента, поради структурната симетрия, имат почти еднакви по стойност и с един и същ знак офсети, а изходните им сигнали са с противоположен знак, [7, 8]. Освен това се използват два токоизточника в режим на зададен ток и три операционни усилватели. В резултат двата офсета, които се генерират от един и същ преобразователен обем в подложката са минимизирани съществено. Сдвоените сензори на Хол като клас магниточувствителни компоненти са прецизни микросистеми за множество

приложения в роботиката и мехатрониката. Постига се известно компенсиране и на температурния дрейф на офсета като работната честота на функциониране на схемата е относително висока, [7]. Недостатък на това решение, обаче е усложненият интерфейс, включващ три специализирани операционни усилватели и два отделни токоизточника.

В настоящата статия е представен иновативен сдвоен микросензор на Хол, редуцирането на офсета на който се постига чрез опростено свързване на контактите, без използване на усложнен интерфейс.

КОНСТРУКЦИЯ И РЕАЛИЗАЦИЯ НА СДВОЕНИЯ МИКРОСЕНЗОР НА ХОЛ

а) Предложената сензорна конфигурация на Хол съдържа тънка *n*-тип силициева пластина с форма на паралелепипед, Фиг. 1.



Фиг. 1. Планиметрия на сдвоения силициев микросензор на Хол и схемата на включване

Върху двете дълги странични повърхности на n -Si подложка са реализирани на разстояния и симетрично една срещу друга четири двойки омични контакти, състоящи се съответно от първи C_1 и втори C_2 , трети C_3 и четвърти C_4 , пети C_5 и шести C_6 , седми C_7 и осми C_8 . При това контактите с четни номера са върху едната страна, а нечетните – върху срещуположната. Първият C_1 и петият C_5 контакт са свързани с изводите на токоизточник в режим генератор на ток $I_s = \text{const}$. Първият C_1 и четвъртият C_4 , и съответно петият C_5 и осмият C_8 контакт са съединени. Вторият C_2 и третият C_3 , и съответно шестият C_6 и седмият C_7 контакт са електрически свързани. Измерваното външно магнитно поле \mathbf{B} е перпендикулярно на равнината на n -Si подложка, а диференциалният изход $V_H(\mathbf{B}) \equiv C_{2,6}(\mathbf{B})$ на сензорната конфигурация са вторият C_2 и шестият C_6 контакт

б) Прототипът на сдвоения елемент на Хол от Фиг. 1 е осъществен с процеси от биполярната IC технология. Силициевата подложка е с n -тип примесна проводимост, специфичното съпротивление съставлява $\rho \approx 7.5 \Omega \cdot \text{cm}$, концентрацията на донорните атоми N_D и на електроните n_0 е $N_D \approx n_0 \approx 4.3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Технологичното изпълнение на образците е с четири маски, подобно на описаните в [9, 10]. Първата маска определя отворите за n^+ - имплантацията на омичните контакти $C_1, C_2 \dots C_8$ с n -Si подложка като дълбочината на n^+ - n преходите е около $1 \mu\text{m}$. Легиращата донорна концентрация n^+ при имплантацията е около 10^{20} cm^{-3} . Втората маска дефинира ринг с p -тип примесна проводимост и правоъгълна форма, ограничаващ активната област на двата функционално интегрирани в нея елементи на Хол, Фиг. 1. Чрез ринга се редуцира разтичането на двете токови компоненти по повърхността на чипа като ширината му на повърхността на подложката е $20 \mu\text{m}$ (по маска). Освен това в обема на подложката рингът ограничава преобразователната област на микросензора. Третата маска осъществява метализацията и площадките за бондиране на силициевия чип. Четвъртата маска опре-

деля контактните отвори върху повърхностния слой от SiO_2 за реализация на електрическите контакти между металните шини и n^+ -омичните контакти. Размерите на правоъгълната n -силициева подложка е $60 \times 180 \mu\text{m}^2$. Размерите на ефективния обем (пространствената резолюция) се определя в първо приближение от проникването на криволинейната траектория на токоносителите в n -Si структура. В нашия случай страничното проникване при използваната концентрация на електроните n_0 и размерите на контактите е около $30 - 40 \mu\text{m}$. По тази причина ефективният преобразователен обем на сдвоената конфигурация на Хол от Фиг. 1 е около $60 \times 180 \times 40 \mu\text{m}^3$, което е съществена резолюция за голям спектър от приложения. Изказваме благодарност на проф. О. Паул и екипа му от ИМТЕК, Фрайбург, Германия за съдействието и подкрепата в изследванията.

в) Образците са проектирани за електрични и галваномангнитни изследвания при температури $T = 300 \text{ K}$, и течен азот $T = 77 \text{ K}$. Силициевите чипове са асемблирани върху корпуси тип DIP-22. Изследванията при криогенни температури $T = 77 \text{ K}$ (около $-200 \text{ }^\circ\text{C}$) са осъществени директно в средата на течен азот с използване на криостат. Неговата конструкция е оразмерена за работа в електромагнит с водно охлаждане и индукция $B \leq 3.0 \text{ T}$. Магнитното поле се калибрира с магнитометър Metrolab – ТНМ 7025. Общата метрологична грешка при тези експерименти е около $\pm 3.0\%$. Информация за използваните галваномангнитни и температурни методи се съдържа в [11, 12].

ФУНКЦИОНИРАНЕ НА СДВОЕНИЯ МИКРОСЕНЗОР НА ХОЛ

Сдвоената сензорна конфигурация на Хол от Фиг. 1 представлява функционална интеграция в една обща преобразователна зона в силициевия чип на два четириконтатни елемента на Хол, предложени и изследвани за първи път от Руменин, [11-13]. Те са формирани от контактите на лявата и дясната страна на право-

ъгълната силициева подложка С₁-С₃-С₅-С₇ и съответно С₂-С₄-С₆-С₈. Действието на този елемент на Хол е следното. При включване на контакти С₁-С₅ и С₄-С₈ към генератора на ток както и симетрично разположените омичните контакти един срещу друг в *n*-тип структурата, протичат два еднакви и съпосочни токови компоненти $I_{C1,5} = I_{C4,8}$. Техните траектории са криволинейни. Тази особеност е в резултат на екипотенциалността на омичните електроди С₁-С₅ и С₄-С₈ в отсъствие на магнитно поле ***V***. Токовете първоначално са насочени странично и перпендикулярно на дългите страни на *n*-Si подложка, след което стават успоредни на дългите страни в обема. Потенциалите върху захранващите контакти С₁-С₅ и съответно С₄-С₈ при поле $B = 0$ имат на практика едни и същи стойности, $V_1 \approx V_5$, и съответно $V_4 \approx V_8$. Всеки един от двата извода на изхода $V_H(B) \equiv C_{2,6}(B)$ обединява отличаващи се по стойност двойки потенциали, генерирани от контакти С₂ и С₃, и съответно С₆ и С₇. Всяка от тези групи електроди е с различно структурно разположение спрямо токовите линии $I_{C1,5}$ и $I_{C4,8}$. Така двата контакта – вторият С₂ и седмият С₇ са външни по отношение на токовите линии $I_{C1,5}$ и $I_{C4,8}$, а третият С₃ и шестият С₆ са вътрешни спрямо траекториите. Електричното свързване на втория С₂ с третия С₃, и съответно на шестия С₆ със седмия С₇ води до максимално усредняване и компенсиране на потенциалите между двата извода на изхода $V_H(B) \equiv C_{2,6}(B)$ на конфигурацията в отсъствие на магнитно поле $B = 0$. Ето защо офсетът чрез това иновативно свързване е значително минимизиран. По тези причини измервателната точност е съществено повишена за целите на слабополевата и високоточната магнитометрия. Използването на един токоизточник вместо два опростява захранването на конфигурацията, Фиг. 1. При геометрично оптимизиране на конструкцията може да се променят разстоянията между контактите, както и ширините им.

Наличието на външно магнитно поле ***V*** води до възникване на странично от-

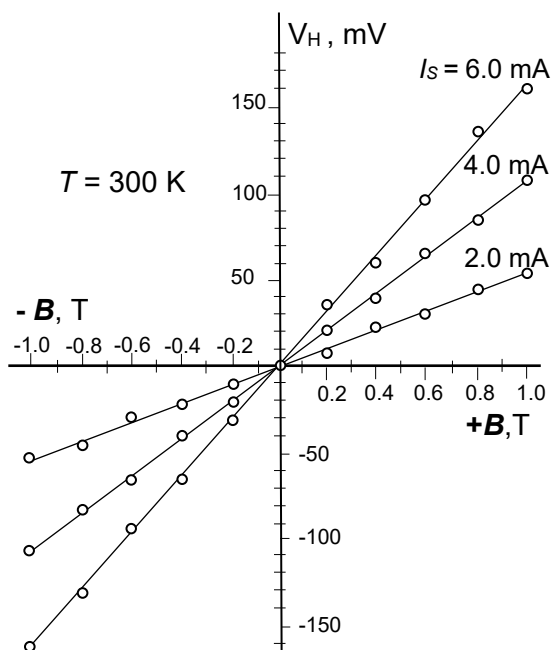
клонение на движещите се носители от компоненти $I_{C1,5}$ и $I_{C4,8}$ от силите на Лоренц, $F_{L,i} = qV_{dr} \times B$ в равнината на *n*-Si подложка, където *q* е елементарният товар на електрона, а V_{dr} е векторът на средната дрейфова скорост на токоносителите. В резултат на специфичната сензорна конструкция и посоките на полето ***V*** и захранващите токове, Лоренцовото отклонение ***F_L*** на техните траектории осъществява за едната компонента, например $I_{C1,5}$, състояние на „свиване”, а за другата $I_{C4,8}$ – на „разгъване”. Това води до генериране на допълнителни потенциали с противоположен знак в областите, където са разположени изходните контакти С₂-С₃ и съответно С₆ и С₇. Така възникналото напрежение на Хол $V_H(B)$ на изхода е метрологичният индикатор за индукцията *B* и посоката на магнитното поле ***V***. Ако приложението го изисква, могат да се използват генератори на ток $I_{C1,5} = I_{C4,8} = \text{const}$ за двата четириконтатни (4С) микросензори. Така се постига независимо функциониране на двата елемента на Хол, аналогично на [7, 8]. Изменението на единия ток, например, $I_{C1,5}$, променя Холовото напрежение само на конфигурацията от лявата страна на *n*-Si пластина, без да влияе на изхода на 4С елемента от дясната. Обратно, промяната само на захранващата компонента на дясния четириконтатен сензор 4С не променя чувствителността *S* на този върху лявата страна. В нашия случай, обаче е необходимо двата захранващи тока в двата елемента 4С на Хол да са равни $I_{C1,5} = I_{C4,8}$ с цел еднаква чувствителност и компенсиране на остатъчния офсет.

При захранване с токоизточник в режим на зададен ток също се редуцира температурният дрейф на офсета. Температурната стабилизация на магниточувствителността *S* на двата обединени сензорни елемента е в резултат на захранването генератор на постоянен ток. Този режим запазва постоянство на концентрацията $N_D \approx n_0$ на електроните в транспортния процес, както и минимизиране на температурното изменение на подвижността μ_n им. Така се постига непроменена в първо приближение чувстви-

телност в широк температурен обхват без каквито и да са допълнителни електронни схеми и компоненти. В резултат захранването и редуцирането на офсата са едновременно опростени. Така се повишава метрологичната резолюция при детектиране на минималната стойност на магнитната индукция B_{\min} чрез нарасналото отношение сигнал-шум S/N . Това разширява сферата на приложимост за целите на криотрониката, особено в слабополевата магнитометрия и контра-тероризма. За още по-висока чувствителност за целите на геофизиката на земния магнетизъм, чипът с новата конфигурация на Хол може да се разположи между два еднакви продълговати концентратори на магнитното поле \mathbf{B} от ферит или метал.

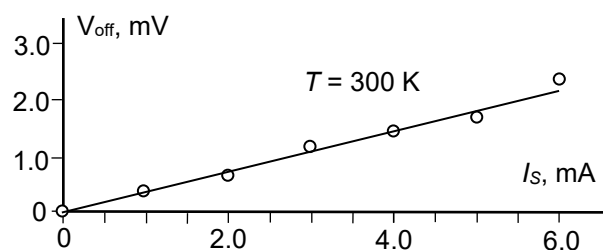
ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ

Изходните напрежения $V_H(\mathbf{B})$ на сдвоения микросензор на Хол са показани на Фиг. 2. Получената относителна магниточувствителност, съставляват $S_R \approx 27 \text{ V/AT}$. Зависимостите са линейни и нечетни. Нелинейността NL в диапазона $B \leq \pm 0.5 \text{ T}$ достига около $NL \leq 0.3\%$, а в интервала $B \leq \pm 1.0 \text{ T}$ параметърът NL не надвишава $NL \leq 1.1\%$.



Фиг. 2. Изходни характеристики на сдвоения микросензор на Хол при параметър тока I_s , $T = 300 \text{ K}$

На Фиг. 3 е показана функцията на офсата от захранващия ток $I_s = \text{const}$. Освен че стойностите на $V_{\text{off}}(B = 0)$ са минимизирани, друга важна особеност е, че този параметър в първо приближение линейно нараства от захранващия ток. Стойността на V_{off} при типична стойност на тока 4.0 mA съставлява $V_{\text{off}} \approx 1.4 \text{ mV}$. Този резултат е подходящ за множество приложения, например в автоматизацията на процесите и медицината.



Фиг. 3. Минимизираният от конструкцията офсет на микросензора от Фиг. 1 във функция на захранващия ток I_s

Проведените експерименти с прототипи на новия сдвоен елемент на Хол установиха, че в режим на зададен ток магниточувствителността не се променя повече от 3% в широк температурен диапазон $77 \text{ K} - 300 \text{ K}$, въпреки че подвижността нараства около 5 пъти, [14]. Такава стабилност на преобразователната ефективност S_R чрез работния режим е напълно достатъчна за целите на роботиката и мехатрониката. Експериментите показват, че шумовата спектрална плътност в обхвата на честоти $f \leq 1000 \text{ Hz}$ е от тип $1/f$ – фликер шум, подобно на резултатите в [11, 15-18]. С увеличаването на захранващия ток I_s , нивото на собствения шум нараства също. Най-ниската стойност на детектираното магнитно поле, определена с израза $B_{\min} = [S_{NV}(f)\Delta f]^{1/2}$ за сдвоената конфигурация на Хол при общ ток на захранване $I_s = 2.0 \text{ mA}$ в честотния диапазон $f \leq 100 \text{ Hz}$ и отношение сигнал/шум $S/N = 1$ съставлява $B_{\min} \approx 12 \mu\text{T}$. Методът за определяне на шума и параметъра B_{\min} се съдържа в [11].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ИЗВОДИ

Получените резултати със сдвоения микросензор на Хол са обещаващи, особено с повишената измервателна точност, постигната с минимизирания офсет. В сравнение с други тя е по-голяма с около 4%, [11, 12]. Той е компенсирал чрез оригиналното свързване на контактите на двата отделни елемента на Хол, а не чрез схемно изваждане на изходните им напрежения, както е в известното решение. Предимство на предложеното решение е опростеното хранване, съдържащо само един токоизточник. Също така отпада необходимостта от специализирани операционни усилватели в интерфейса. Детектирането на минималната стойност на магнитната индукция B_{\min} чрез нарасналото отношение сигнал-шум от редуцирания офсет осигурява повишена метрологична резолюция. Важно свойство на новия микросензор е минимизираният температурен дрейф на характеристиките в широк температурен обхват в резултат на хранването генератор на постоянен ток. Анализът показва, че в основата на сдвоения микросензор е заложен дуалният принцип на функциониране. От една страна преобразувателят се активизира с ортогонално на равнината си магнитно поле както е при класическите елементи на Хол. От друга обаче действието му е както при вертикалните или равнинно-чувствителните Холови пластини – с успоредно на повърхността им магнитно поле. Тази особеност предстои да се изследва с цел разширяване на многообразието от нови конструкции сензори на Хол. Бъдещото развитие на този клас конфигурации е като магнитни сензорни микросистеми за целите на роботиката, безконтактната автоматика, минимално инвазивната хирургия и лапароскопията, позиционирането на обекти в пространството, в подводните, наземните и въздушните системи за наблюдение и навигация, слабополевата магнитометрия и др.

Изследванията са осъществени със съдействието на Националния ЦК „Да Винчи“ № BG05M2OP001-1.002-0010-C01

REFERENCE

- [1] Middelhoek S., Audet SA. Silicon Sensors, Acad. Press. London, 1989.
- [2] Ramsden E. Hall effect sensors – Theory and application, 2nd ed., Elsevier, Netherland, 2006.
- [3] Munter P., Spinning-current method for offset reduction in silicon Hall plates, Delft University Press, 1992.
- [4] Bilotti A, Monreal G, Vig R. Monolithic magnetic Hall sensor using dynamic quadrature offset cancellation, IEEE Jour. of Solid-State Circuits, 32 (6), 1997, p. 829 – 836.
- [5] Steiner R, Maier C, Häberli A, Steiner F, Baltes H. Offset reduction in Hall devices by continuous spinning current method, Sens. Actuators, A 66 (1-3), 1998, p. 167–172.
- [6] Kaufmann T. On the offset and sensitivity of CMOS-based five-contact vertical Hall devices, Der Andere Verlag, Uelvesbull, MEMS Techn. and Engin., v. 21, 2013.
- [7] Vanha RS. Rotary switch and current monitor by Hall-based microsystems, PEL, Zurich, ETH-Hoenggerberg, 1999.
- [8] Steiner R, Schneider M, Baltes H. Double Hall sensor with self-compensated offset, Intern. Electron Device Meeting (IEDM'97), Techn. Digest, 1997, p. 911-914.
- [9] Tanase D. Magnetic-based navigation system for endovascular interventions, Optima Publ., Rotterdam, 2003.
- [10] Schott C, Popovic R. Integrated 3-D magnetic-field sensor, Proc. of Transducers'99, Sendai, Japan, v. 1, 1999, p. 168-171.
- [11] Roumenin C. Solid State Magnetic Sensors, Elsevier, Amsterdam, New York, 1994.
- [12] Roumenin C., Microsensors for magnetic field, in J.G. Korvink and O. Paul, eds, in MEMS – a practical guide to design, analysis and application, W. Andrew Publ., USA, p. 453-521, 2006.
- [13] Roumenin C. Hall effect sensor, BG Patent № 41974 B1/06.05.1986.
- [14] Morin FJ, Maita JP. Electrical properties of silicon containing arsenic and boron, Phys. Rev., 96(1), 1954, p. 28-35.
- [15] Sander C, Vecchi M.-C., Cornils M, Paul O. From three-contact vertical Hall elements to symmetrized vertical Hall sensors with low offset, Sens. Actuators, A 240, 2016, p. 92-102.
- [16] Lozanova S, Roumenin C. Parallel-field silicon Hall effect microsensors with minimal design complexity, IEEE Sensors Journ., 9(7), 2009, p. 761-766.
- [17] Hooge FN, Kleinpenning TGM, Vandamme LKG. Experimental studies on $1/f$ noise, Rep. Progr. Phys., 44, 1981, p. 479-532.
- [18] Pascal J, Hebrand L, Krammerer J, Frick V, Blonde JP. First vertical Hall device in standard 0.35 μm CMOS technology, Sens. Actuators, A 147, 2008, p. 41-46.