

Интегрален Хол-сензор с динамична компенсация на напрежението на несиметрия Integrated Hall-sensor with Dynamic Offset Compensation

Prof. D.Sc. Kamen Ventzislavov Fillyov¹,
Prof. D.Sc. Tihomir Borisov Takov²,
Eng. Tzvetelina Petrova Tzeneva^{1,2},
Eng. Slaveiko Kirov Neytchev¹, Ph.D

¹ Technology Centre – Institute of Microelectronics Ltd, Sofia

² Technical University – Sofia, FETT, Dept.KTPPME

Abstract: *The present work describes a solution for dynamic offset compensation of integrated Hall-sensors using orthogonally switching technique based on the periodical permutation of the supply and output contact pairs of single symmetrical Hall-plate. The commutation of contact pairs able distinguishing of the Hall-voltage from the offset because in this case the one of these voltages keeps its magnitude and polarity unchanged, while the other signal component retains its value and alters its polarity. The dynamic offset cancellation is performed by the signal-conditioning circuitry following the Hall-plate which processing the signals from each of the two consecutive switching of the sensor plate using sample&hold technique. The presented analogue circuits is a part of a programmable Hall-sensor, which represents a mixed-signal CMOS IC designed by 2 μ m CMOS N-well Alcatel MIETEC technology using CAD system CADENCE.*

1. Въведение

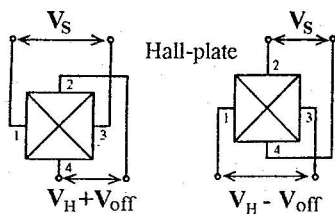
Большинството от съвременните магнитни сензори се реализират във вид на интегрални силициеви схеми, поради възможността да се интегрира в един чип сензорния елемент (обикновено Хол-сензор) и електронната схема за усилване и обработка на сигналите [1]. Това позволява подобряване на основните характеристиките на сензора: ниво на сигнала, температурна стабилност, офсет, нелинейност и др. В последните години се създават и програмируеми магнитни сензори, представляващи аналого-цифрови ИС с Хол-елемент, при които се задава от потребителя вида на изходната характеристика, обхвата на измерваните магнитни полета, температурния коефициент на изходния сигнал и др.

Премахването (редуцирането) на офсета на Хол-прибора е една от най-важните задачи при проектиране на магнитосензорните системи, тъй като той основно определя точността при измерване на постоянни магнитни полета [1,2]. Поради невисоката подвижност на токоносителите в Si, магниточувствителността на силициевите интегрални Хол-сензори има типични стойности

$S_V=0.04-0.09T^{-1}$. Генерираното Хол-напрежение в тези случаи е в порядъка на $(x.0.1-x.10)mV$ при типично захранване на сензора $5V$ и магнитни полета $B \leq 100mT$. За сравнение - офсетът на Хол-пластината е в порядъка на $(x.0.1-x.1)mV$, като стойността му варира дори за даден образец поради температурни и времеви дрейф. Основните причини за появата на офсата са: несиметрия в геометрията на сензора, неравномерно разпределение на специфичното съпротивление, наличие на дефекти и дислокации в кристала, както и на механични напрежения, пораждащи пиезорезистивни ефекти и др.[2]. Аналогично влиянието върху точността при измерванията има и офсата на включвания непосредствено след сензора усилвател. И докато неговото компенсиране се извършва сравнително лесно и ефективно посредством някоя от известните техники, премахането на офсата на Хол-сензора е значително по-трудно, поради липсата на такова състояние на прибора, при което да се изолира офсата от Хол-напрежението. За тази цел са разработени и се използват различни подходи за компенсиране на офсата на сензора, като само една част от тях са приложими при Хол-сензорните интегрални схеми. В настоящия доклад е представено едно схематично решение за динамична компенсация на офсата, използвайки като основа един от най-ефективните подходи – метода с ортогонално превключване на Хол-пластината [3-6]. Описаната аналогова схема с интегрален Хол-елемент представлява част от програмируем Хол-сензор проектиран чрез САПР CADENCE във вид на монолитна аналого-цифрова ИС със стандартни клетки по $2\mu m$ CMOS N-well Alcatel MIETEC технология.

2. Метод за компенсиране на офсата чрез ортогонално превключване на Хол-елемента

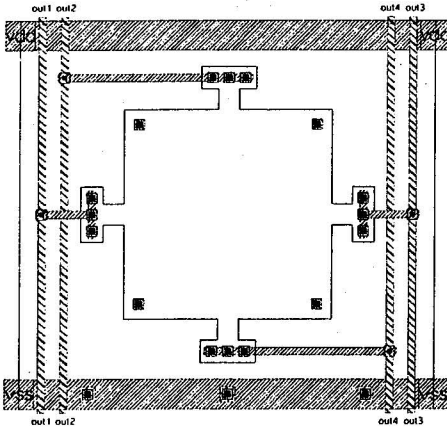
Използваният метод се основава на периодична размяна на сигналните и захранващите изводи на Хол-сензора чрез “ортогонално” превключване на захранващо напрежение V_S от едната двойка срещуположни изводи на другата, фиг.1. При наличие на магнитно поле, между съответните сигнални изводи (2 и 4 за позиция I, респ. 3 и 1 за позиция II) се генерира Хол-напрежение $V_H \approx S_V \cdot B \cdot V_S$, където B е индукцията на магнитното поле, а S_V – относителната магниточувствителност на Хол-елемента, зависи от подвижността на токоносителите и геометрията на активната сензорна област. Тъй като Хол-елемента е с ортогонално симетрична форма (с еквивалентни изводи), фиг.2, магниточувствителността в двете позиции е еднаква и Хол-напрежението V_H при една и съща магнитна индукция е с еднаква стойност и полярност и в двете позиции. Промяната на офсата на Хол-сензора при превключването може да се определи чрез представянето му с еквивалентна четири-



Фиг.1 Ортогонално превключване на Хол-елемента

телителите и геометрията на активната сензорна област. Тъй като Хол-елемента е с ортогонално симетрична форма (с еквивалентни изводи), фиг.2, магниточувствителността в двете позиции е еднаква и Хол-напрежението V_H при една и съща магнитна индукция е с еднаква стойност и полярност и в двете позиции. Промяната на офсата на Хол-сензора при превключването може да се определи чрез представянето му с еквивалентна четири-

раменна мостова схема, при което офсета е резултат на разбалансирането на моста [7]. Анализът на зависимостите за V_{off} за двете позиции показва, че офсета при превключването променя своята полярност (за разлика от Хол-напрежението), като запазва приблизително една и съща големина.



Фиг.2 Топология на интегралния Хол-сензор, проектиран във вид на стандартна клетка по 2 μ m CMOS Alcatel MIETEC технология

Ортогоналното превключване позволява да се разграничат един от друг полезния сигнал и офсета, без използването на специални техники за калибриране или екраниране на Хол-елемента от магнитните полета. Премахването на офсета на сензора се осъществява чрез обработка (сумиране) на сигналите от двете позиции при превключването, при което същевременно се удвоява Хол-напрежението.

Преимущество на този подход пред останалите методи за компенсация на офсета на интегралните Хол-елементи, е простата конструкция на сензорния елемент за разлика от тази при

метода с промяна на чувствителността [2], както и по-доброто редуциране на офсета в сравнение с метода с два еднакви ортогонално свързани Хол-елемента.

3. Интегрален CMOS Хол-елемент

За целта на разработката е проектиран един интегрален Si Хол-сензор във вид на стандартна клетка по 2 μ m CMOS N-дjob Alcatel MIETEC технология. Активната област на сензора, имаща квадратна форма с изводни рамена, и изводните области са формирани в N-дjoba, фиг.2. Използването на този слой за сензорната област позволява да се получи сравнително висока магниточувствителност поради по-високата подвижност на основните токоносители и по-ниската им концентрация. С цел да не се шунтира Хол-напрежението е избрано широчина на изводните рамена да е десет пъти по-малка от размера на активната област.

Напрежението на Хол V_H при захранване с напрежение V_S се дава с израза:

$$V_H = \mu_H \left(\frac{w}{l} \right) G V_S B \quad (1)$$

където μ_H е подвижността на електроните, l и w са дължината и широчината на сензорната област, G е геометричния фактор, зависещ от w/l и Хол-ъгъла θ_H [2].

При избраното отношение $w/l=1$ за геометричния фактор при слаби магнитни полета е приета стойността $G \approx 0.683$ [8]. Подвижността на електроните за

n-Si с концентрация на примесите $9.3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ е $0.12 \text{ m}^2/\text{Vs}$. Относителната магниточувствителност на прибора

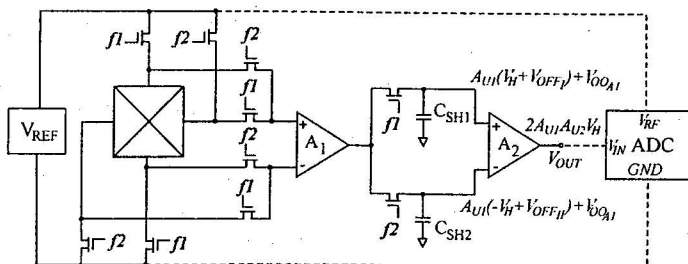
$$S_V = \frac{1}{V_S} \left(\frac{\partial V_H}{\partial B} \right) = \mu_H \frac{w}{l} G \quad (2)$$

е приблизително 0.082 T^{-1} , а напрежението на Хол се определя с израза $V_{H1} \approx 0.082 V_S B$. Входното и изходно съпротивление на сензора имат типична стойност около $7.5 \text{ k}\Omega$.

4. Аналогова схема за динамична компенсация на офсета на интегралния Хол-сензор

На база на описания метод с ортогонално превключване на Хол-елемента е синтезирана аналогова схема за динамична компенсация на офсета му, представляваща част от проектирания програмируем Хол-сензор във вид на монолитна аналого-цифрова ИС по $2 \mu\text{m}$ CMOS MIETEC технология със стандартни клетки. В тази интегрална схема сигналът от Хол-елемента се усилва с различен коефициент за работа в няколко обхвата магнитни полета и се компенсира офсета му, след което се преобразува в цифров вид чрез АЦП, извършва се цифрова обработка и отново се превръща в аналогов вид чрез ЦАП. В резултат от цифровата обработка съобразно програмируемите коефициенти, записани във вътрешната памет, се премахва температурното влияние върху Хол-напрежението и се получава линеен изходен сигнал, съгласно програмираната форма на преработената характеристика $V_{out} = f(B)$.

В представеното схемотехнично решение (фиг.3) превключването на Хол-сензора и обработката на сигналите се осъществява с помощта на аналогови ключове, управлявани от противотактните правоъгълни импулсни поредици $f1$ и $f2$. Използвано е обратно свързване на изходните контакти в едно от положе-

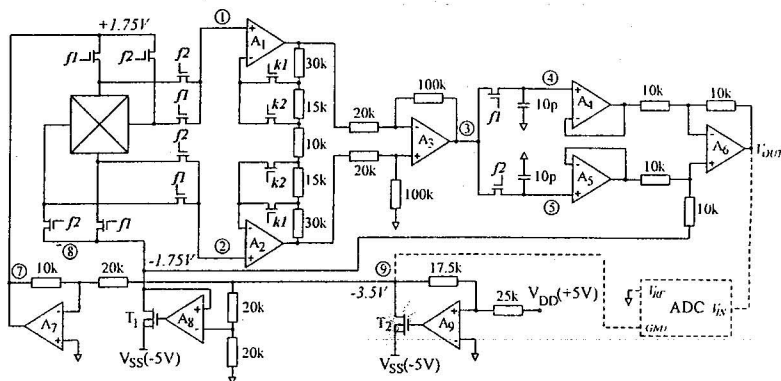


Фиг. 3 Блокова схема на проектираната аналогова схема с динамична компенсация на офсета на Хол-елемента

ние, при което сигналите от двете положения се изваждат при обработката в диференциалния усилвател A2. В резултат едновременно се компенсират офсетите на Хол-елемента V_{OFF} и на първия диференциален усилвател A1 (V_{00A1}), осъществяващ основното усиление на сигнала от сензорния елемент. За запомняне на сигнала от предходното превключване са използвани елементи

sample/hold (следене/запомняне), включени във двата входа на А2. Влиянието на захранващото напрежение на Хол-елемента върху изходния сигнал е минимизирано чрез използване на едно и също напрежение за захранване на сензора и като опорно напрежение на АЦП. С цел максимално използване на АЦП се работи в два обхвата на магнитните полета ($\pm 50\text{mT}$ и $\pm 200\text{mT}$), при програмируем коефициент на усилване на А1.

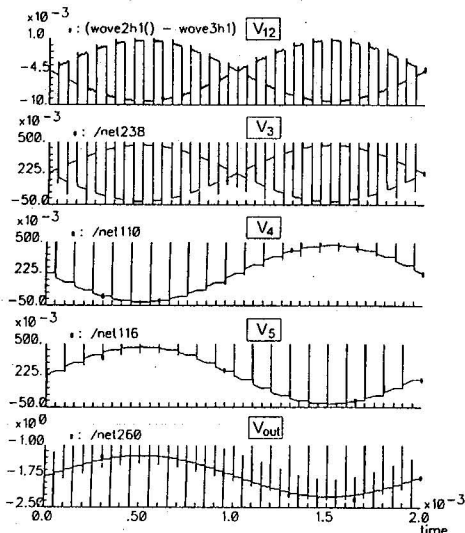
Конкретното схемно решение, фиг.4, е синтезирано съобразно специфичните изисквания за съгласуване на аналоговата с цифровата част на схемата и характеристиките на аналоговите стандартни клетки. За целта на разработката са проектирани аналогови ключове с много малки паразитни капацитети за минимизиране на прехвърления заряд от управляващия вход при превключването на ключа. Единствено при ключовете, подаващи захранващото напрежение на Хол-елемента, са използвани стандартните библиотечни аналогови ключове *CFASW*, имащи малко съпротивление във включено състояние, с цел намаляване на напрежението върху тях. Поради недостатъчното подтискане на синфазните сигнали от използваните операционни усилватели *CFOAHLN*, захранването на Хол-елемента се задава така, че изходните му електроди да имат потенциал приблизително 0V , при който грешката от синфазните сигнали е най-малка. В изходите на ОУ А7 и А9 са включени NMOS транзистори Т1 и Т2, явяващи се като допълнително стъпало на усилвателите, за стабилизиране на опорните напрежения ($V_7=1.75\text{V}$ и $V_9=-3.5\text{V}$) при сравнително големите и вариращи във времето стойности на токове на консумация на тези стъпала ($0.5\text{mA} \div 1.3\text{mA}$). Изходното ниво при $V=0$ е фиксирано в средата на опорното напрежение на АЦП ($V_{\text{out}}(0)=-1.75\text{V}$) с цел измервания при еднакви обхвати на двуполярни магнитни полета.



Фиг.4 Принципна схема на Хол-сензорната аналогова схема с динамична компенсация на офсата

Проведените симулации при постоянно Хол-напрежение за различни магнитни полета в обхвата $\pm 50\text{mT}$ и приет офсет на сензора $V_{\text{OFF}}=4.36\text{mV}$ показаха

много добра компенсация на офсетите на сензора и на първия диференциален усилвател. Полученото отклонение под 1.8% на стойността на изходното напрежение на схемата от теоретично определеното се дължи основно на по-ниския коефициент на усилване в сравнение с теоретично изчисления поради неидеалността на използваните ОУ.



Фиг.5 Сигнали при синусоидално Хол-напрежение с амплитуда $V_H=5mV$ ($B=17.4mT$) и офсет на сензора $V_{off}=4.36mV$

технология със стандартни клетки. Нейно основно преимущество е динамичната компенсация на офсетите на сензорния елемент и на усилвателя, включително техните температурни и временни дрейфове, извършвана на основата на метода с ортогонално превключване на Хол-елемента. Това схемно решение позволява извършването на безконтактни измервания, както на параметрите на магнитни полета в диапазона $\pm 200mT$ и честота под $1kHz$, така и на редица електрични или неелектрични величини посредством Хол-елемент и е подходящо за използване в програмируеми и интелигентни магнитни сензори.

На фиг.5 са показани и резултатите от проведените симулации при синусоидално Хол-напрежение с честота $500Hz$ и амплитуда $5mV$, съответстваща на магнитна индукция $B=17.4mV$. В този случай се получава дефазироване на изходния сигнал спрямо входния с около четвърт период на управляващите сигнали. Същевременно се появява и допълнителна грешка от дискретизация (в конкретния случай тя е под 1%), която се увеличава при по-голяма скорост на изменение на Хол-напрежението.

5.3. Заключение

Проектирана е аналогова интегрална схема, включваща интегрален Хол-сензор, по $2\mu m$ CMOS N-well Alcatel MIETEC

References

- [1] Т. Таков and В. Минчев, Полупроводникови датчици, Техника, София, 1986
- [2] Chavdar Roumenin, Solid state magnetic sensors, Elsevier Science, Amsterdam, 1994
- [3] P. Daniil and E. Cohen, Journal Applied Physics, vol. 53, 1982, pp. 8257-8259
- [4] P. J. A. Munter, Sensors and Actuators "A", vol. 21-23, 1990, pp. 743-746
- [5] P. J. A. Munter and D.C. van Duyn, Sensors and Actuators "A", vol. 31, 1992, pp. 206-209
- [6] A. Bilotti, G. Monreal, R. Vig, IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol.32 (6), 1997, pp. 829-835
- [7] Y. Kanda, M. Migitaka, H. Yamamoto, IEEE Trans. of Electron devices, vol. ED-29, 1982, pp. 151-154
- [8] E. V. Kuchis, Galvanomagnetic effects and methods for their investigation, Radio i Sviaz, Moskwa, 1990