

АМПЕРОМЕТРИЧЕН РЕЖИМ НА МАГНИТОТРАНЗИСТОРНИТЕ СЕНЗОРИ

проф. дтн Ч. Руменин - Българска Академия на Науките
проф. дтн Т. Таков - Технически Университет, София

На учения доц. д-р инж. Григор
Цветков, който ни напусна така
внезапно се посвещава този труд.
Авторите

AMPEROMETRIC MODE OF OPERATION OF MAGNETOTRANSISTOR SENSORS

*Prof. Dr. Ch. Roumenin - Bulg. Academy of Sciences
Prof. Dr. T. Takov - Technical University of Sofia*

Abstract: A new operating mode of bipolar magnetotransistors (BMT) is suggested and investigated experimentally. It is achieved without reverse biasing of the collector junctions and by using the current between the two "floating" collectors as an information signal. The output current is a linear and polar function of the magnetic field. The advantages of the amperometric operation change dramatically our concept of BMT as transducing devices. The reverse collector current, which is an indispensable feature of classical BMT's turns out to be their principal disadvantage.

1. Въведение. Практически не съществуват житейски ситуации, при които да не се изиска регистрарирането на физични и химични параметри на средата, която ни заобикаля, нейния мониторинг, контрол и управление. Типични примери са измерването на температурата в помещението, където преминава деня ни или на самите нас, когато сме неразположени; концентрацията на вредните газове в залите на рудниците, включително и при урановото производство; нивото на замърсяване от вонящия дим на лули, пури или цигари в модерните трансконтинентални еърбъси, подводните бази и др.; евентуалното прогнозиране на вулканична активност по вариациите на геомагнитното поле, и т.н. Не би била пресилена тезата, че най-атрактивни, високотехнологични и универсални са приложенията на магнитометрията. Освен станалата вече класика безконтактна автоматика, все по-често медиците се обръщат към магнитния ангилиз на мозъчните и сърдечните функции на хора и животни.

Сред широкото разнообразие от различни типове и модификации сензори за магнитно поле, магнитотранзисторите (МТ) притежават някои специфични предимства като висок изходен сигнал, вследствие на транзисторното усиливане; твърде добра линейност за

широк кръг аналогови устройства; лесно елиминиране на офсета; възможност за създаване на двумерни и тримерни векторни магнитометри и мултисензори за магнитно поле, температура и светлина; широк динамичен интервал и високо отношение сигнал/шум; относително нисък температурен дрейф на характеристиките; и др. В частност МТ могат да се реализират със стандартни интегрални технологии (за съжаление все още не в нашата страна след целенасоченото ликвидиране на микроелектрониката), предоставящи освен евтино серийно производство, но и станалата все още норма за индустриален прогрес едночипова комбинация на МТ елемент и съществуващи схеми - захранване, обработка на сигнала, компенсиране на грешките, усилване, самотестиране и самокалибиране, както и редица други атрибути на интелигентните сензорни системи, [1,2].

Развитието на МТ основно е свързано с усъвършенстване на технологичните операции за изготвяне при все още изчерпания арсенал от оригинални приборни конструкции. Достатъчно категоричен в този аспект е страниният факт, че над 90 % от представените на престижни сензорни форуми като EUROSENSORS и TRANSDUCERS материали третират технологични подобрения, взаимствани от IC производството на известни МТ прибори [3], а на последния EUROSENSORS X биполярните магнитотранзистори бяха покрити със забвение, [4]. По наше мнение именно в тази област от магнитосензорната електроника съществуват редица иновативни решения, включващи и нови сензорни механизми, които освен чисто фундаменталния си характер, притежават и определена практическа стойност.

Създателят на транзистора W. Shockley би останал в не малка степен изненадан, ако узнаеше, че задължителното колекторно захранване, реализиращо усилвателната функция и в магнитотранзисторите може да бъде отстранено, при това с постигане на нов и положителен ефект. В настоящата статия е предложен и изследван амперометричен режим на работа на МТ сензори, постигаш се с премахване на традиционния колекторен източник. Полезният сигнал представлява възникващия в магнитно поле В ток между "плаващите" колектори, който е линейна и полярна функция от параметъра В.

2. Същност на МТ амперометричен режим. Анализът на новия амперометричен режим на МТ, без това да ограничава общността на получените изводи, е проведен на примера на латералния диференциален МТ, схематично представен на Фиг.1. Характерна особеност на прибора е отсъствието на задължително този захранване E_C , поляризиращо в обратна посока двата колекторни p-n прехода и с което се постига усилване по напрежение на транзисторите. С генератора на ток I_E еmitterът Е се включва в права посока по отношение на двата симетрично разположени базови контакти B_1 и B_2 , [5]. На този етап ние

целенасочено не се спираме на интересните и дискусионни въпроси дали в този вид сензорът от Фиг.1 е транзистор или представлява диференциален диод, снабден с две регистриращи сонди C_1 и C_2 , или е качествено нов микроприбор. За удобство приемаме, че конструкцията от Фиг.1 е биполярен диференциален МТ, функциониращ в нетрадиционен работен режим. Действието на този р-п-р сензор е следното. При включване в права посока на емитера Е част от инжектираните в базовата област неосновни носители (дупки) достигат до двата "плаващи" колекторни р-п прехода и чрез вграденото в тях електрично поле се акумулират в p^+ -областите. В резултат колекторите C_1 и C_2 , и базата се зареждат съответно положително и отрицателно. Установява се динамично равновесие между екстракцията на дупките от п- базовата област и инжеекцията им от р-п прехода в п- базата и т.н. Ето защо "висящите" р-п преходи при достатъчно високи стойности на емитерния ток по същество са квазиправополяризириани. Върху двата колектора се генерира инжекционно напрежение V_{inj} в предположение, че токът през тях отсъства. Това напрежение се определя със зависимостта:

$$V_{inj} = m \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{\alpha I_E + I_s}{I_s} \right) = m \frac{kT}{q} \ln \left(1 + \frac{\alpha I_E}{I_s} \right), \quad (1)$$

където $m=1/2$ е безразмерен коефициент, зависещ от типа МТ и токът I_E , I_s е обратният колекторен ток, α е коефициентът на усилване по ток при традиционен работен режим, а останалите обозначения са общоприети, [6,7].

Инжекционното напрежение V_{inj} намалява едновременно потенциалната бариера ϕ_k и областта на пространствен товар l на двата колекторни p^+ -п прехода. Този процес е аналогичен на подаване върху C_1 и C_2 на право напрежение. Съгласно уравнение (1) с увеличаване (намаляване) на инжеекцията, т.е. на тока I_E , напрежението V_{inj} нараства (намалява) логаритмично. Когато потенциалните бариери на двата колектора станат съизмерими с kT , нарастването на V_{inj} се преустановява. Следователно инжекционното напрежение не може да превишава контактната потенциална разлика между p^+ - и п-областите, която в частност за Si р-п преходи е около 0.8V при $T=300K$. В интегралните МТ обикновено р-п преходите са едностранини, като в разглеждания случай контактната потенциална разлика ϕ_k при $N_A \gg N_D$ е свързана с ширината на областта на пространствен товар l и с инжекционния потенциал V_{inj} чрез познатия израз:

$$\phi_k - V_{inj} = \left(\frac{4\pi q N_D l^2}{\epsilon} \right) \frac{2}{2} \quad (2)$$

където ϵ е статичната диелектрична константа на полупроводника.

От (2) се вижда, че разстоянието l намалява с увеличаване на V_{inj} , т.е. на тока I_E , като при $V_{inj} \rightarrow \phi_k$ параметърът $l \rightarrow 0$. Ако колекторът C_1 или C_2 се непосредствено свърже с един от базовите контакти B_1 или B_2 ,

то във тази верига пропорционален на V_{inj} , и съответният колектор ефективно екстрагира дупки от базовата област. В случая при $I \rightarrow 0$ може да се приеме, че ролята на p^+ -n прехода е аналогична на описан контакт както при n^+ -n преходите, т.е. p^+ -n преходът е квазивправополяризиран и е с ниско съпротивление.

Прилагането на външно магнитно поле B чрез действието на силата на Lorentz върху инжектираниите носители води до полярна модулация на двете инжекционни колекторни напрежения $V_{C1,inj}(0) + \Delta V_{C1,inj}(B)$ и $V_{C2,inj}(0) + \Delta V_{C2,inj}(B)$. В отсъствие на магнитоконцентрация, магнитодиоден ефект и модулация на емитерната инжекция, често срещани механизми за микроструктури от типа на Фиг.1, [2], стойностите на двете изменения $\pm V_{C,inj}$ са равни и линейно зависят от индукцията B . В резултат полето B генерира върху "плаващите" колектори C_1 и C_2 магнитоинжекционни потенциали, които са равни по стойност и са с противоположен знак. Този магниточувствителен ефект ще бъде по-силно изразен при високи стойности на емитерния ток, когато електричното поле, генерирано от основните носители в базовата област повиши допълнително скоростта на инжектирани дупки, а следователно и съответните магнитоинжекционни потенциали. Остават в сила всички съществуващи подходи за усилване и оптимизиране на магнитотранзисторното действие, независимо от вида и типа МТ приборна конструкция.

Амперометричният режим на функциониране на МТ сензори е по същество нов галваномагнитен ефект, който се заключава в еквивалентното токово изражение на така генерираните магнитоинжекционни потенциали върху C_1 и C_2 . На практика това се осъществява чрез окъсяване на напрежението $\Delta V_{c12,inj}(B)$ и информационният сигнал за стойността и посоката на магнитното поле представлява токът $\Delta I_{c12,inj}(B)$. Очевидно е, че токовият изход ще бъде линейна и полярна функция от полето B . Магнитоинжекционният ток следва да има циркулярен характер. Той преминава през обемното разпределено съпротивление r_0 на активната сензорна област и квазивправополяризираните колектори C_1 и C_2 , и вътрешното съпротивление R на измервателя на ток. В резултат се получава релацията:

$$\Delta I_{c12,inj}(B) = \Delta V_{c12,inj}(B) / (r_0 + R) \quad (3)$$

Следователно амперометричният изход на МТ сензора може целенасочено да се управлява и оптимизира чрез разпределеното базово съпротивление, зависещо от технологичните и конструктивните приборни параметри, площта на колекторните p-n преходи и най-вече от захранващия емитерен ток I_E .

3. Особености на амперометричния режим. Новият режим на функциониране е експериментално проверен върху многобройни образци на различни по своята приборна конструкция интегрални МТ

сензори. Като илюстрация на Фиг.2 са представени изходните характеристики на силициев диференциален МТ, аналогичен на показания на Фиг.1 при стайна и азотна температура. Следва специално да се отбележи, че стойностите на изходния ток са от един порядък с тези на съответните МТ с традиционно колекторно захранване. Принципната разлика между двата работни режима се заключава в последователността на конверсията на първоначално генерирания в магнитно поле сигнал. При конвенционалното включване изменениета на колекторните токове чрез усилване се превръщат в изходно напрежение, а във втория - магнитоинжекционното напрежение се трансформира в изходен ток.

Основните предимства на новия способ на функциониране на МТ сензори са:

1. Опростена схемотехнична реализация, поради отсъствие на традиционното обратно поляризиране на колекторните p-n преходи.
2. Изходът е нискоомен (токов), което повишава шумоустойчивостта на магнито-чувствителния сигнал при транслирането му на разстояние.
3. Отсъствието на високите по стойност колекторни резистори намалява допълнително топлинния шум в работния честотен диапазон.
4. Не е от съществено значение качеството на p-n преходите в МТ сензори, тъй като те всички функционират в права посока, което от своя страна опростява технологичната реализация на приборите и повишава рандемана на годната продукция.
5. Лесно нулиране на неминуемия офсет чрез тримера r (Фиг.1) и което е особено важно в практическите приложения - температурно стабилна "нула" в широк температурен интервал. Това важно свойство е следствие от отсъствието на офсет при поле $B=0$, като двата обратни колекторни тока I_S са с противоположна посока. При класическото включване на МТ, колкото е по-голям токът в обратнополяризираните колектори при $B=0$, толкова е по-съществен температурният дрейф на изхода. Освен това температурното поведение на колекторите е независимо, докато в нашия случай токът $\Delta I_{c_1, \text{inj}}(B)$ е общ за C_1 и C_2 .
6. Съществено понижаване на разсейваната от сензора мощност, поради премахване на обратното поляризиране на колекторните p-n преходи и съвместимост с CMOS интегралната схемотехника.
7. Отсъствие на паразитен термосигнал, неотличим от магниточувствителния, вследствие минимизирането на условията за топлинна асиметрия. Такава асиметрия в конвенционалните МТ се генерира основно от колекторните p-n преходи чрез полярната промяна в магнитно поле на токовете $I_{c_1}(B)$ и $I_{c_2}(B)$. В сензора от

Фиг.1 обаче изходният ток е един и същ за C_1 и C_2 . В амперометричния режим полето B не създава температурна асиметрия в микроструктурата чрез токовия изход.

8. Съществено повишаване на отношението сигнал/шум в сравнение с конвенционалното вклъчване, вследствие отсъствието на колекторен ток при $B=0$. Спектралната плътност на мощността на шума от тип $1/f$ е квадратична функция на колекторния ток при $B \leq 0,2T$, но в новия режим на работа $I_{C1}(0)$ и $I_{C2}(0)$ отсъстват. По тази причина при ниски честоти $0 \leq f \leq 10\text{Hz}$ шумът $1/f$ ще се понижи с десетки дб.
 9. Запазване на мултисензорните свойства на МТ за едновременно и независимо измерване на магнитното поле и на температурата на околната среда, както и възможността за реализиране на интегрални векторни магнитометри [2].
 10. Използване на целия захранващ ток за генериране на магниточувствителност, тъй като отсъстват обратните колекторни токове $I_{C1}(0)$ и $I_{C2}(0)$. Те редуцират в конвенционалните МТ базовия рекомбинационен ток I_B от основни носители, ($|I_B|=|I_E-I_C|$), първопричина за ускоряващо инжеектираните носители поле и за диодния ефект на Хол, [2].
 11. Новият сензорен режим функционира и в областта на криогенните температури, което съществено разширява приложимостта му в слабополевата магнитометрия поради рязкото нарастване на чувствителността и отношението сигнал/шум. Ако при тези екзотични условия приборът бъде снабден с подходящи магнитни концентратори, би било възможно регистрирането на биомагнитни полета, един от актуалните проблеми на модерната медицина и микробиология.
 12. Амперометричният режим е универсален за всички магнитотранзистори и сродните на тях прибори като разширява обхвата на приложимостта им.
- Особеност на новия магниточувствителен режим е непълната екстракция без и със магнитно поле на всички неосновни носители, достигнали "плаващите" колектори C_1 и C_2 , тъй като отсъства обратна поляризация и част от тях се "отразяват" от р-областите. Също така новият ефект в сензора от фиг.1 се съпровожда с възникване в магнитно поле B и на циркуационен междубазов ток $I_{B1,2}(B)$ при непосредствено свързване на B_1 и B_2 , или на напрежение $V_{B1,2}(B)$ при вклъчване на резистори в B_1 и B_2 . Произходит на този магниточувствителен сигнал е ефектът на Хол, аналогично на триизводния Хол сензор, [2].

4. **Заключение.** Въпреки началната фаза на изследване на новия МТ режим, чрез този способ на функциониране експериментално е наблюдавано при криогенни температури индуцирането на ос с максимална магниточувствителност, съществено отличаваща се (в зависимост от емитерния ток) от тази при $T=300\text{K}$, независимо от вида

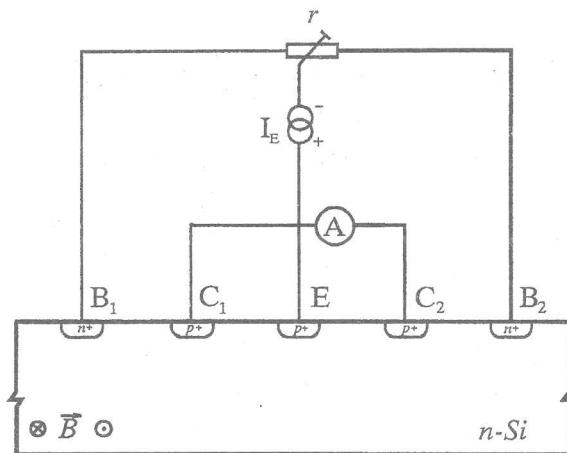
МТ. Следва специално да се отбележи, че при стайна температура максималната чувствителност съвпада с посоката, определена от взаимната перпендикулярност на протичащия ток I_E и външното магнитно поле B . Обаче, при температура $T=77K$ най-високата стойност на изходния сигнал възниква при отклонение $20^\circ\div45^\circ$ от оптималната ос за $T=300K$. Тази уникална особеност при $T=77K$ изчезва ако МТ се включи по традиционния способ с колекторно захранване или ако се регистрира само магнитоинжекционното напрежение. Една вероятна причина за този ефект е може би нарастналата стойност при $B=\text{const}$ на циркулационния междуколекторен ток $\Delta I_{c2,inj}(B)$ и взаимодействието му с магнитното поле.

Новите амперометрични прибори, използвани магнитотранзисторно действие са перспективни както за целите на контролно-измервателната техника и индустриалните приложения, а така също стимулират изследователската активност на един екип от специалисти у нас, за който сензорната микроелектроника не е и не може да бъде минало време.

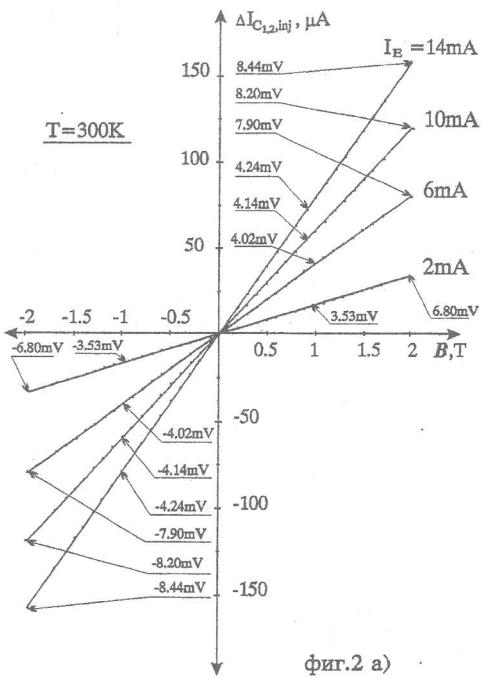
Изследванията са извършени в Лабораторията по сензори и интелигентни сензорни системи на ИУСИ-БАН, и са финансиирани от фонд "Научни изследвания" при МОНТ.

ЛИТЕРАТУРА

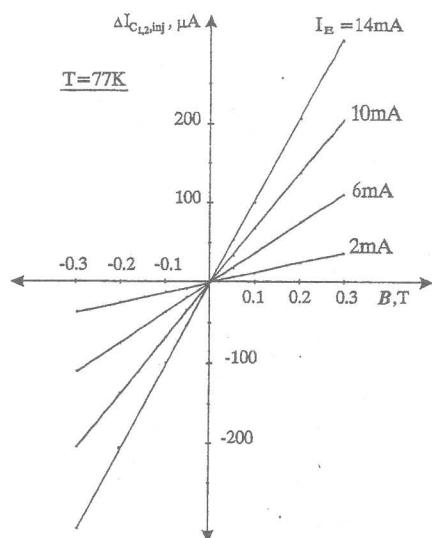
1. Т. Таков, В. Минчев, Полупроводникови датчици, София, Техника, 1986, стр. 183.
2. Ch.S. Roumenin, Solid State Magnetic Sensors, ELSEVIER SCI. PUBL., Amsterdam, 1994, pp. 434.
3. The 8th Intern. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators and EUROSENSORS IX, Digest of Techn. Papers, June 25-29, 1995, Stockholm, Sweden, v.1 and v.2.
4. Proc. of EUROSENSORS X, v.1 and v.4, September 8-11, 1996, Leuven, Belgium.
5. T. Takov, Ch. Roumenin, T. Tzeneva, P. Nikolova, D. Doychev, B. Sokolov, New mode of operation of magnetotransistor sensors, Compt. rendus ABS, 12(49)(1996), in press.
6. И.П. Степаненко, Основы теории транзисторов и транз. схем, М., 1967, стр. 615.
7. Д.В. Игумнов, И.С. Громов, Эксплуатацион. параметры и особен. применения полевых транзисторов, М, 1981, стр. 64.



фиг.1 Напречно сечение на латерален паралелно-полеви магнитотранзистор и схемата на включване за наблюдаване на новия амперометричен режим



фиг.2 а)



фиг.2 б)

фиг.2 Изходни характеристики на биполярен МТ в амперометричен режим при параметър захранвания ток: а) $T=300\text{K}$, указаны съответните стойности на магнитоинжекционното напрежение $\Delta V_{C_{1,2},inj}(B)$, и б) $T=77\text{K}$