

УДК 681.586.72

МОДЕЛЮВАННЯ СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВОСТОКОВОГО МАГНІТОЧУТЛИВОГО МОН-ТРАНЗИСТОРА

В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. П. Білилівська

Вінницький національний технічний університет

вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021, Україна. E-mail: stovbcha@mail.ru

Наведена покращена модель двостокового магніточутливого МОН-транзистора, який завдяки високій чутливості належить до перспективних приладів напівпровідникової магнітовимірювальної техніки. Запропонована модель описує його статичні характеристики з урахуванням впливу магнітного поля на розподіл струму між стоками та на провідність каналу, а також відображає залежність характеристик від геометричних розмірів транзистора. Наведено стокозатворні характеристики та залежності різницевого струму від магнітної індукції, напруг на затворі й на стоках, побудовані шляхом комп'ютерного моделювання з використанням програмного пакету MatLab. Отримано рівняння відносної струмової чутливості двостокового магнітотранзистора. Проведено порівняння результатів моделювання з експериментальними даними.

Ключові слова: магнітне поле, магнітотранзистор, математична модель, статичні характеристики, чутливість.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХСТОКОВОГО МАГНИТОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО МОП-ТРАНЗИСТОРА

В. С. Осадчук, А. В. Осадчук, О. П. Белиловская

Винницкий национальный технический университет

ул. Хмельницкое шоссе, 95, г. Винница, 21021, Украина. E-mail: stovbcha@mail.ru

Представлена улучшенная модель двухстокового магниточувствительного МОП-транзистора, который благодаря высокой чувствительности принадлежит к перспективным приборам полупроводниковой магнитоизмерительной техники. Предложенная модель описывает его статические характеристики с учётом влияния магнитного поля на распределение тока между стоками и на проводимость канала, а также отражает зависимость характеристик от геометрических размеров транзистора. Приведены построенные путём компьютерного моделирования с использованием программного пакета MatLab стокозатворные характеристики и зависимости разностного тока от магнитной индукции, напряжений на затворе и на стоке. Получено уравнение относительной токовой чувствительности двухстокового магнитотранзистора. Проведено сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными.

Ключевые слова: магнитное поле, магнитотранзистор, математическая модель, статические характеристики, чувствительность.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Сенсори, основою роботи яких є магнітні ефекти, використовуються для вимірювання струму, витрат, лінійних і кутових переміщень, контролю частоти обертання, дефектоскопії і т.д. Крім того, напівпровідникові магнітні перетворювачі завдяки невеликим розмірам, вартості, споживаній потужності та відсутності механічного зносу займають важливе місце в промисловості. Одним із напрямків в цій галузі є розробка магніточутливих приладів на основі польових магнітотранзисторів, які мають високу чутливість і можуть бути виготовлені на одному кристалі зі схемами обробки завдяки технологічній сумісності [1–4].

Розробка таких приладів є неможливою без використання математичних моделей для прогнозування характеристик сенсора при його проектуванні. Програмне моделювання є важливим не лише завдяки своїй дешевизні порівняно із фізичним експериментом, а й тому, що воно надає можливість «проникнути» у фізичні механізми роботи приладів і будувати моделі дво- та тривимірних структур [5].

На даний час існують різні види реалізації багатоелектродних транзисторів [4, 6–8], проведені їх експериментальні дослідження [4, 8–10], пропонуються методи підвищення магніточутливості тощо. Однак теоретичне обґрунтування фізичних процесів, на яких базується робота МОН-магнітотранзисторів, є поки що недостатнім для побудови адекватних комп'ютерних моделей, які дозволили б значно ско-

ротити час проектування магніточутливих приладів. Серед існуючих моделей двостокових транзисторів можна виділити наступні: чисельна модель [10], яка є точною, однак не пояснює роботу пристрою; напіваналітичні моделі [11, 12], що поєднують фізику напівпровідників й електромагнітну теорію, але потребують виконання оберненого перетворення Лапласа; SPICE модель МОН-транзистора [13], в якій відхилення струму внаслідок дії магнітного поля враховується за допомогою керованого джерела струму; моделі на основі емпіричних співвідношень, які не відображають фізичну суть пристрою та геометричні ефекти. У роботі [14] наведена проста модель двостокового МОН-транзистора, яка описує перерозподіл струму під дією магнітного поля, однак не враховує зміну провідності каналу і придатна для опису характеристик лише в лінійному режимі.

Метою роботи є вдосконалення математичної моделі статичних характеристик двостокового магніточутливого МОН-транзистора за рахунок врахування впливу магнітного поля, на розподіл носіїв заряду між стоками та на електрофізичні властивості області каналу.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Багатостокові магнітотранзистори є найбільш перспективними серед польових магніточутливих приладів, оскільки їх структура дозволяє отримати вищу чутливість порівняно з елементами Холла [3]. Струм каналу розподіляється між двома стоками $D1$ і $D2$.

При дії магнітного поля перпендикулярно до поверхні носії заряду під дією сили Лоренца відхиляються в бік одного зі стоків (залежно від \vec{B}), струм одного стоку збільшується, а іншого – зменшується. На рис. 1 S і G – виток і затвор, W і L – ширина і довжина каналу відповідно.

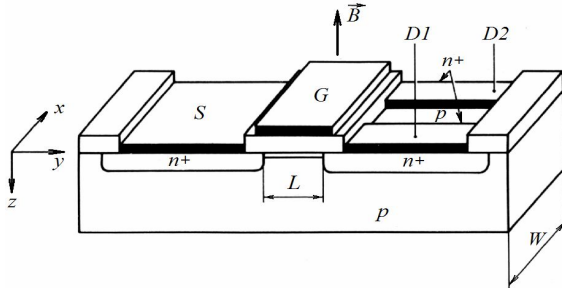


Рисунок 1 – Принципова структура двостокового магнітотранзистора [4]

Як відомо, при дії поперечного магнітного поля, модуль індукції якого дорівнює B , на напівпровідникову пластину зі струмом її питомий опір збільшується. Тому відносну зміну електропровідності σ каналу польового n -канального транзистора під дією магнітного поля можна виразити як [15]

$$\frac{\sigma_0 - \sigma_B}{\sigma_0} = \frac{\mu_{Hn}^2 B^2}{2}, \quad (1)$$

де σ_0 та σ_B – провідність каналу відповідно без дії та при дії магнітного поля індукцією B , μ_{Hn} – холлівська рухливість електронів.

Можна вважати, що холлівська рухливість електронів дорівнює дрейфовій рухливості ($\mu_{Hn} = \mu_n$). Крім того, вираз (1) не враховує статистичного розкиду довжин вільного пробігу електронів.

Таким чином, вираз для електропровідності каналу при дії магнітного поля можна записати як

$$\sigma_B = \sigma_0 \left(1 - \frac{\mu_n^2 B^2}{2} \right). \quad (2)$$

Однак, як було сказано раніше, найважливішим ефектом у польовому двостоковому магнітотранзисторі є перерозподіл струму між стоками. Для розрахунку різницевого струму стоків розглянемо спочатку процеси в одній половині транзистора, наприклад, в каналі між витоків S і стоком $D1$.

Якщо на транзистор не діє магнітне поле і немає різниці потенціалів між двома стоками (так звані балансні умови), стокові струми однакові, при чому

$$I_{DS10} = \frac{I_{DS}}{2} = J_{n0} h \frac{W}{2} = \sigma_0 E h \frac{W}{2}, \quad (3)$$

де I_{DS10} , J_{n0} – струм першого стоку та густина електронного струму за відсутності магнітного поля, I_{DS} – загальний стоковий струм, h – глибина каналу, E – модуль напруженості електричного поля.

При прикладенні поперечного магнітного поля струм стоку $D1$ зменшується, при чому ефективна площа стоку зменшується на величину

$$\Delta S = h \Delta W, \quad (4)$$

де $\Delta W = L \cdot \operatorname{tg} \theta$ – відстань, на яку відхиляються носії заряду біля стоків, θ – кут Холла, $\operatorname{tg} \theta = \mu_n B$.

Тоді, за аналогією до формули (3), струм стоку при дії магнітного поля можна розрахувати як

$$I_{DS1B} = J_{nB} h \left(\frac{W}{2} - \Delta W \right) = \sigma_B E h \left(\frac{W}{2} - L \mu_n B \right). \quad (5)$$

Із врахуванням виразів (2), (3)

$$\begin{aligned} I_{DS1B} &= \sigma_0 E h \left(\frac{W}{2} - L \mu_n B \right) \left(1 - \frac{\mu_n^2 B^2}{2} \right) = \\ &= I_{DS10} \left(1 - 2 \frac{L}{W} \mu_n B \right) \left(1 - \frac{\mu_n^2 B^2}{2} \right). \end{aligned} \quad (6)$$

Струм другого стоку відрізнятиметься тільки знаком перед двійкою у перших дужках, оскільки він збільшується при дії магнітного поля $\vec{B} \ominus$.

Важливою характеристикою двостокового транзистора є залежність різницевого струму стоків від магнітної індукції, яка на основі (6) дорівнює

$$\Delta I_{DSB} = |I_{DS2B} - I_{DS1B}| = 4 \left(1 - \frac{\mu_n^2 B^2}{2} \right) I_{DS10} \frac{L}{W} \mu_n B. \quad (7)$$

Вираз (7) показує, що різницевий струм прямо пропорційний відношенню довжини каналу до його ширини, а це збігається із наведеними у [8] результатами експериментальних досліджень.

Відносна струмова чутливість двостокового польового магнітотранзистора визначається як [14]

$$S_{RI} = \left| \frac{1}{I_{DS}} \frac{\Delta I_{DSB}}{B} \right|. \quad (8)$$

Якщо двостоковий транзистор працює в режимі насичення, його магнітна чутливість не може бути виражена так просто. Однак результати експериментів показали, що магнітна чутливість не зазнає значних змін при переході від лінійного режиму роботи до режиму насичення транзистора [4].

Підставивши (7) у (8), матимемо:

$$S_{RI} = 2 \frac{L}{W} \mu_n \left(1 - \frac{\mu_n^2 B^2}{2} \right). \quad (9)$$

Отриманий вираз пояснює зменшення магніточутливості польового двостокового транзистора при збільшенні магнітної індукції. При малих значеннях індукції прикладеного магнітного поля відносну чутливість можна визначити у вигляді [4]

$$S_{RI} = \left| \frac{1}{I_{DS}} \frac{\partial (I_{DS1B} - I_{DS2B})}{\partial B} \right|_{B=0}, \quad (10)$$

тобто як похідну відносного розбалансу струмів першого і другого стоків по магнітній індукції, взяту при нульовій індукції.

Підставивши (7) у (10), отримаємо вираз

$$S_{RI} = 2 \frac{L}{W} \mu_n, \quad (11)$$

відповідно до якої чутливість двостокового польового магнітотранзистора залежить тільки від холлівської рухливості та відношення довжини каналу до його ширини. Вираз (9) зводиться до (11), якщо відкинути квадратичну складову, яка при малих полях є набагато меншою, ніж основна складова.

Отримаємо тепер загальні вирази струму двостокового магнітотранзистора, які описують його статичні характеристики.

Відомо, що струм стоку польового транзистора у лінійній області та області насичення відповідно визначається рівняннями [5]

$$I_{DS} = \frac{W\mu_n C_0}{L} [(U_{GS} - U_0)U_{DS} - 0,5U_{DS}^2]; \quad (12)$$

$$I_{DSsat} = \frac{W\mu_n C_0}{2L} (U_{GS} - U_0)^2, \quad (13)$$

де C_0 – ємність одиничної площі підзатворного діелектрика, U_0 – порогова напруга.

У наведених вище виразах не врахований ефект модуляції довжини каналу, який описує незначне збільшення струму стоку при зростанні напруги між стоком і витокотом транзистора. Із введенням множника, що описує ефект модуляції довжини каналу [16], врахуванням (3) та введенням множника $1/2$ (оскільки струм каналу при відсутності дії магнітного поля порівну розподіляється між двома стоками) матимемо струм першого стоку

$$I_{DS1B} = \frac{W\mu_n C_0}{2L} [(U_{GS} - U_0)U_{DS1} - 0,5U_{DS1}^2] \times (1 + \lambda U_{DS1}) \left(1 - 2 \frac{L}{W} \mu_n B\right) \left(1 - \frac{\mu_n^2 B^2}{2}\right); \quad (14)$$

$$I_{DS1Bsat} = \frac{W\mu_n C_0}{4L} (U_{GS} - U_0)^2 (1 + \lambda U_{DS1}) \times \left(1 - 2 \frac{L}{W} \mu_n B\right) \left(1 - \frac{\mu_n^2 B^2}{2}\right); \quad (15)$$

де λ – коефіцієнт модуляції довжини каналу, а величину $1/\lambda$ називають ранньою напругою.

Отримані вирази (14) та (15) складають основу математичної моделі статичних характеристик двостокового магнітотранзистора. Вони справедливі і для магнітотранзистора з каналом p -типу, якщо μ_n замінити на μ_p (рухливість дірок), а також врахувати зміну знаку напруги між витокотом та стоком U_{DS1} .

Комп'ютерне моделювання статичних характеристик двостокового n -канального магнітотранзистора проведено з використанням програмного пакету для науково-технічних розрахунків MatLab, оскільки даний пакет програм дає можливість отримувати як аналітичні вирази на основі розв'язку систем рівнянь, так і будувати графічні характеристики на основі заданих аналітичних залежностей та відомих значень констант і змінних. При моделюванні характеристик використано такі параметри транзистора:

концентрація домішок у підкладці – 10^{15} см^{-3} , товщина оксиду – 60 нм , ширина і довжина каналу – 100 мкм і 125 мкм відповідно, ширина зазору між стоками – 10 мкм .

Змодельовані залежності струмів першого (I_{DS1}) та другого (I_{DS2}) стоків польового магнітотранзистора від напруги на затворі (U_{GS}) при напрузі на стоках $U_{DS1,2} = 1 \text{ В}$ та значеннях магнітної індукції $B = 0$ (крива 1), $B = 50 \text{ мТл}$ (криві 2 і 3) наведені на рис. 2.

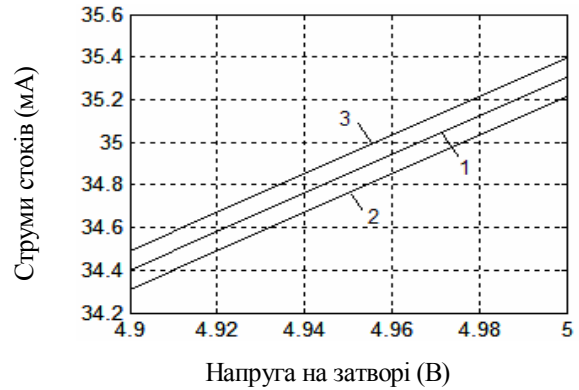


Рисунок 2 – Залежності струмів стоків від напруги на затворі: 1 – $I_{DS10} = I_{DS20}$, 2 – I_{DS1B} , 3 – I_{DS2B}

Графічні залежності, представлені на рис. 2, відповідають роботі магнітотранзистора в лінійному режимі. Вони показують зміну електричних характеристик двостокового магнітотранзистора при прикладенні зовнішнього магнітного поля, тобто зменшення струму одного стоку та збільшення струму другого відповідно до (14).

Шляхом моделювання у системі MatLab отримана залежність різницевого струму від магнітної індукції при напрузі на затворі $U_{GS} = 4,95 \text{ В}$ та напрузі на стоках $U_{DS1,2} = 1 \text{ В}$. Дана залежність, а також результати експериментальних досліджень двостокового магнітотранзистора [17] з такими ж самими параметрами, наведені на рис. 3. Бачимо, що результати моделювання добре узгоджуються з експериментальними даними.

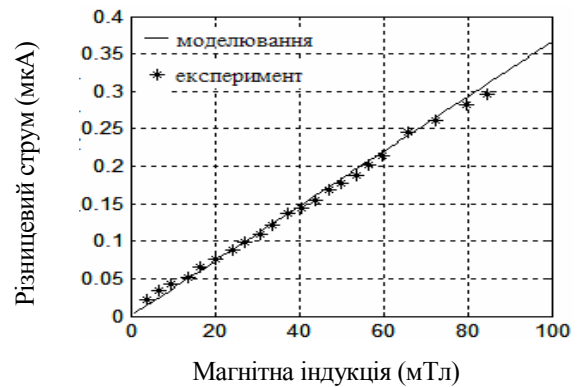


Рисунок 3 – Залежності різницевого струму стоків від магнітної індукції

Оскільки характеристика, подана на рис. 3, є практично лінійною, то відносна струмова чутливість двостокового приладу слабо залежить від магнітного поля і, як показують розрахунки за формулою (11), при малих значеннях магнітної індукції вона складає близько $5,25\% / Tл$.

Графіки, представлені на рис. 4, показують результати моделювання залежностей різничевого струму стоків від напруги на затворі при напрузі на стоках $U_{DS1,2} = 1 В$.

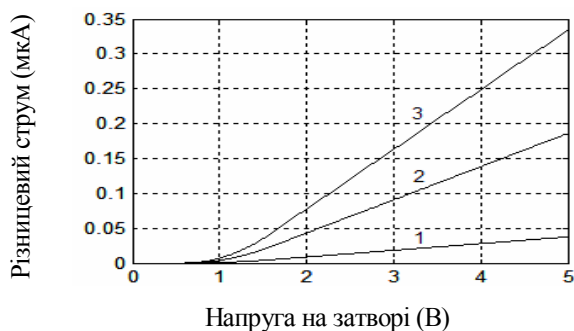


Рисунок 4 – Залежності різничевого струму стоків від напруги на затворі при індукції магнітного поля: 1 – $B = 10 \text{ мТл}$, 2 – $B = 50 \text{ мТл}$, 3 – $B = 90 \text{ мТл}$

На основі виразів для чутливості (9) та (11) було показано, що відносна зміна різничевого струму не залежить від прикладених напруг стік – витік, а також і від напруги затвор – витік. Тому графіки, зображені на рис. 4, виявляють такий самий характер, як і стокозатворні характеристики звичайного польового МОН-транзистора [16], тобто абсолютне значення різничевого струму збільшується при наростанні напруги на затворі.

На рис. 5 зображені змодельовані залежності різничевого струму стоків від напруги на стоці при напрузі на затворі $U_{GS} = 4,95 В$.

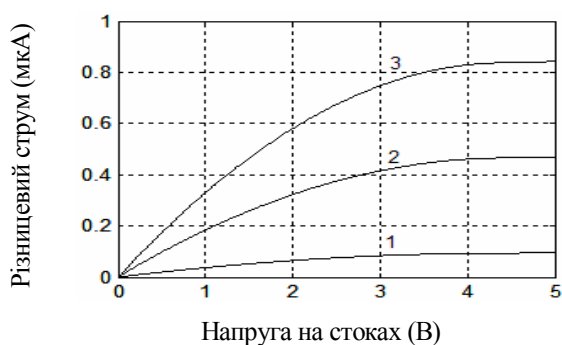


Рисунок 5 – Залежності різничевого струму стоків від напруги на стоках при дії магнітної індукції: 1 – $B = 10 \text{ мТл}$, 2 – $B = 50 \text{ мТл}$, 3 – $B = 90 \text{ мТл}$

Графіки на рис. 5 за характером відповідають вихідним характеристикам МОН-транзистора у схемі включення зі спільним витокком [16]: при роботі транзистора в лінійному режимі різничевий струм значно збільшується із ростом прикладеної напруги між стоком і витокком, а в режимі насичення ця залежність проявляється слабо.

Зростання значення різничевого струму при збільшенні магнітної індукції, що виявляється на рис. 4 та рис. 5, збігається із результатами моделювання та експерименту, представленими вище на рис. 3.

ВИСНОВКИ. Запропонована математична модель, яка описує статичні характеристики двостокового магніточутливого МОН-транзистора. Модель враховує вплив магнітного поля на розподіл носіїв заряду між стоками та провідність області каналу, геометричні ефекти, ефект модуляції довжини каналу. За допомогою моделювання з використанням програмного пакету MatLab побудовано стокозатворні характеристики, залежності різничевого струму від магнітної індукції, напруг на затворі й на стоках. Отримано аналітичний вираз відносною струмовою чутливості двостокового магнітотранзистора, а також розраховано її значення, що для розглянутої структури дорівнює $5,25\% / Tл$. Проведено порівняння результатів роботи, що показало відповідність моделювання експериментальним даним.

ЛІТЕРАТУРА

1. Heremans J. Solid state magnetic field sensors and applications // Journal of Physics D: Applied Physics. – 1993. – Vol. 26. – № 8. – PP. 1149–1168.
2. Сенсори тиску і магнітного поля: монографія / В.С. Осадчук, О.В. Осадчук. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 207 с.
3. Аналіз конструкцій та класифікація польових магніточутливих елементів / В.С. Осадчук, О.В. Осадчук, О.П. Білилівська // Вісник Хмельницького національного університету. – 2012. – № 3. – С. 75–79.
4. Popovic R.S. Hall effect devices. – Bristol; Philadelphia: Institute of Physics, 2004. – 419 p.
5. Device Modeling for Analog and RF CMOS Circuit Design / T. Ytterdal, Y. Cheng, T.A. Fjeldly. – Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2003. – 306 p.
6. Pat. 5,757,055 USA, Int. Cl⁶ H01L29/82. Triple drain magneto field effect transistor with high conductivity central drain / Jeffrey C. Kalb, Jr.; assignee: Intel Corporation. – appl. No. 718,058; filed 17.09.1996; published 26.05.1998.
7. Kordalski W. Horizontally-split-drain MAGFET – a highly sensitive magnetic field sensor / W. Kordalski, M. Polowczyk, M. Panek // Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical sciences. – 2007. – Vol. 55, № 3. – PP. 325–329.
8. Daříček M., Donoval M., Šatka A. (2009), “Behavior of various geometry MagFET structures” // ECCTD 2009, the 19th European Conference on Circuit Theory and Design, Antalya, August 23–27, pp. 17–20.
9. Drain and gate voltage influences on MAGFET offset and sensitivity: modeling and experiment / A. M. Ionescu, N. Mathieu, A. Chovet // Technical Proceedings of the 1998 International Conference on Modeling and Simulation of Microsystems. – Apr. 6-8 1998, pp. 127–132.
10. Carrier Transport in Semiconductor Detectors of Magnetic Domains / A. Nathan, W. Allegretto, H. P. Baltes, Y. Sugiyama // IEEE Trans. on Electron Devices. – 1987. – Vol. 34. – № 10. – PP. 2077 – 2085.

11. Hentschke S. Digital stochastic magnetic-field detection // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 1996. – Vol. 57. – № 1. – PP. 1–8.

12. Performance Of A MFS-Based MOSFET For Low Temperature Applications / P. J. Garcia-Ramirez, F. Sandoval-Ibarra // *Journal of Applied Research and Technology*. – 2005. – Vol. 1. – PP. 37–43.

13. Fernando C. Castaldo, Carlos A.Reis Filho. Transversal Noise Current in Split-Drain Transistors // *Circuits and Systems, 2006 (ISCAS 2006). Proceedings. IEEE International Symposium on*. – 21–24 May 2006.

14. Compact Model of Dual-Drain MAGFETs Simulation / Yosry E., Fikry W., El-henawy A.,

Marzouk M. // *International Journal of Electronics, Communications and Computer Engineering*. – 2009. – Vol. 1. – № 1. – PP. 112–116.

15. Гальваномагнітні прибори / И.М. Викулин, Л.Ф. Викулина, В.И. Стафеев. – М.: Радио и связь, 1983. – 104 с.

16. Дьюб Динеш С. Электроника: схемы и анализ. – М.: Техносфера, 2008. – 432 с.

17. Rodriguez-Torres R. Three-Dimensional Analysis of a MAGFET at 300 K and 77 K / R. Rodriguez-Torres, R. Klima, S. Selberherr // *Solid-State Device Research Conference, 2002. Proceeding of the 32nd European, ESS-DERC*. – PP. 151–154.

MODELING OF DUAL-DRAIN MAGFET STATIC CHARACTERISTICS

V. Osadchuk, A. Osadchuk, O. Bilyivska

Vinnytsia National Technical University

vul. Khmelnytske Shose, 20, Vinnytsia, 21021, Ukraine. E-mail: stovbcha@mail.ru

This article offers a study of improved model of dual-drain MAGFET (Magnetic Field Effect Transistor), which is a promising semiconductor device due to its high magnetic sensitivity. The proposed model describes static characteristics of transistor including influence of the magnetic field on the distribution of current between the drains and increasing of the channel conductivity. Also the geometrical effects and biasing dependency are taken into account. Transfer characteristics, dependence of the differential current on external magnetic field strength, gate and drain voltage were plotted by simulation using the MATLAB numerical computing environment. The model shows the linear dependence of the differential current on external magnetic field strength. An equation of the relative current sensitivity of dual-drain MAGFET is obtained; its value for the investigated structure is equal to $5,25\%/T$. A comparison of simulation results with experimental data shows excellent agreement.

Key words: magnetic field, MAGFET, mathematical model, static characteristics, sensitivity.

REFERENCES

1. Heremans, J. (1993), “Solid state magnetic field sensors and applications”, *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 26, no. 8, pp. 1149 – 1168.

2. Osadchuk, V.S., Osadchuk, A. V. (2005), *Sensory tysku i magnitnogo polia* [Sensors of pressure and magnetic field], Monograph, Universum, Vinnytsia, Ukraine.

3. Osadchuk, V.S., Osadchuk, A. V., Bilyivska, O.P. (2012), “Analysis and classification of the types of magnetic sensitive elements”, *Bulletin of Khmelnytsky National University*, no.3, pp. 75 – 79.

4. Popovic, R. S. (2004), *Hall effect devices*, Institute of Physics, Bristol, Philadelphia.

5. Ytterdal, T., Cheng, Y., Fjeldly, T. A. (2003), *Device Modeling for Analog and RF CMOS Circuit Design*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester.

6. Pat. 5,757,055 USA, Int. Cl⁶ H01L29/82. Triple drain magneto field effect transistor with high conductivity central drain / Jeffrey C. Kalb, Jr.; assignee: Intel Corporation. – appl. No. 718,058; filed 17.09.1996; published 26.05.1998.

7. Kordalski, W., Polowczyk, M., Panek, M. (2007), “Horizontally-split-drain MAGFET – a highly sensitive magnetic field sensor”, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical sciences*, vol. 55, no. 3, pp. 325 – 329.

8. Daříček, M., Donoval, M., Šatka, A. (2009), “Behavior of various geometry MagFET structures” *ECCTD 2009, the 19th European Conference on Circuit Theory and Design*, Antalya, August 23-27, pp. 17 – 20.

9. Ionescu, A. M., Mathieu, N., Chovet, A. (1998), “Drain and gate voltage influences on MAGFET offset and sensitivity: modeling and experiment”, *Technical Proceedings of the 1998 International Conference on*

Modeling and Simulation of Microsystems. – Apr. 6-8, pp. 127 – 132.

10. Nathan, A., Allegretto, W., Baltes, H.P., Sugiyama, Y. (1987), “Carrier Transport in Semiconductor Detectors of Magnetic Domains”, *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. 34, no. 10, pp. 2077 – 2085.

11. Hentschke, S. (1996), “Digital stochastic magnetic-field detection”, *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 57, no. 1, pp. 1 – 8.

12. Garcia-Ramirez, P. J., Sandoval-Ibarra, F. (2005), “Performance Of A MFS-Based MOSFET For Low Temperature Applications”, *Journal of Applied Research and Technology*, vol. 1, pp. 37 – 43.

13. Fernando C. Castaldo, Carlos A.Reis Filho. (2006), “Transversal Noise Current in Split-Drain Transistors”, *Proceedings of ISCAS 2006, IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, May 21-24, pp. 21-24.

14. Yosry, E., Fikry, W., Elhenawy A., Marzouk, M. (2009), “Compact Model of Dual-Drain MAGFETs Simulation”, *International Journal of Electronics, Communications and Computer Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 112 – 116.

15. Vikulin, I. M. Vikulina, L. F., Stafееv, V. I. (1983), *Galvanomagnitnye pribory* [Galvanomagnetic Devices], Radio i Sviaz, Moscow, Russia.

16. Dinesh, C. Dube. (2008), *Elektronika: skhemy i analiz* [Electronics: Circuits and Analysis], Technosfera, Moscow, Russia.

17. Rodriguez-Torres, R., Klima, R., Selberherr, S. (2002), “Three-Dimensional Analysis of a MAGFET at 300 K and 77 K”, *Proceeding of the 32nd European Solid-State Device Research Conference, ESS-DERC*, 24-26 September, pp. 151 – 154.

Стаття надійшла 14.05.2013.