

УДК 621.315:681.586.78

Эффект зарядовой связи в полевом элементе Холла на основе тонкопленочного КНИ МОП транзистора

© 2021 г. А. В. Леонов¹, В. Н. Мурашев², Д. Н. Иванов^{2,§}, В. Д. Кирилов²

¹ *Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов
Российской академии наук,*

ул. Академика Осипьяна, д. 6, Черноголовка, Московская область, 142432, Россия

² *Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Ленинский просп., д. 4, Москва, 119049, Россия*

Аннотация. Работа посвящена изучению влияния эффекта зарядовой связи на характеристики полевого элемента Холла, изготовленного на основе тонкопленочного МОП транзистора. Анализ развития современной микроэлектроники показал необходимость развития элементной базы датчиков внешних воздействий на основе кремниевой технологии с повышенной функциональностью. Одним из способов значительного улучшения характеристик чувствительных элементов различных воздействий, в том числе и магнитного поля, является создание тонкопленочных транзисторов на основе структуры «кремний на изоляторе» (КНИ). Показано, что полевой датчик Холла (ПДХ) может стать основой высокочувствительных датчиков магнитного поля, использующих эффект зарядовой связи, возникающей в двухзатворной вертикальной топологии такого элемента. Проведены электрофизические исследования ПДХ при различных режимах включения затворов и питания. Полученные результаты показывают, что эффект зарядовой связи между затворами наблюдается в ПДХ при толщине рабочего слоя между ними равным 200 нм. Этот эффект приводит к росту эффективной подвижности носителей, и следовательно к росту магнитной чувствительности. Таким образом, полевые элементы Холла на основе тонкопленочных транзисторов, изготовленных по кремниевой технологии, позволяют значительно повысить магнитную чувствительность и использовать их в датчиках магнитного поля повышенной надежности.

Ключевые слова: транзистор, кремний на изоляторе, полевой датчик Холла, зарядовая связь, магнитное поле

Введение

Микроэлектроника в последние десятилетия развивается особенно быстрыми темпами т. к. напрямую связана с развитием информационных технологий, автоматизации промышленного производства и интернета вещей, который позволяет контролировать и управлять жизненным пространством человека. Понятно, что достижения в микроэлектронике возможны только при создании элементной базы, причем скорость развития должна принадлежать датчикам и микросистемам, обеспечивающий взаимодействие с окружающей средой [1]. Датчики магнитного поля относятся к числу наиболее востребованных в различных общегражданских и специальных применениях. Неудивительно, что

ежегодно в мире объем их производства исчисляется миллиардами штук и возрастает примерно на 10 % [2, 3].

Анализ публикаций по сенсорной тематике показывает, что в этой области кремний является основным материалом при изготовлении чувствительных элементов датчиков и инфраструктурной микроэлектроники, обеспечивающей обработку сигналов, формируемых чувствительным элементом и функционирование датчика в целом [4, 5].

Существенное улучшение характеристик кремниевых микроэлектронных датчиков при сохранении кремниевой технологии может быть решена, если в качестве чувствительных элементов датчиков внешних воздействий использовать тонкопленочные кремниевые полевые транзисторы с двумя вертикальными управляющими затворами, изготовленными на структуре «кремний на изоляторе» [6, 7].

Кремний на изоляторе (КНИ) является важным материалом кремниевой микро- и наноэлектроники. В настоящее время транзисторы на основе КНИ структур активно применяются для создания раз-

Леонов Алексей Владимирович¹ — канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник, e-mail: alex25.08@mail.ru; Мурашев Виктор Николаевич² — доктор техн. наук, профессор, e-mail: vnmu-rashev@mail.ru; Иванов Дмитрий Николаевич^{2,§} — аспирант, e-mail: ivanovdmitry@rocketmail.com; Кирилов В. Д.²

§ Автор для переписки

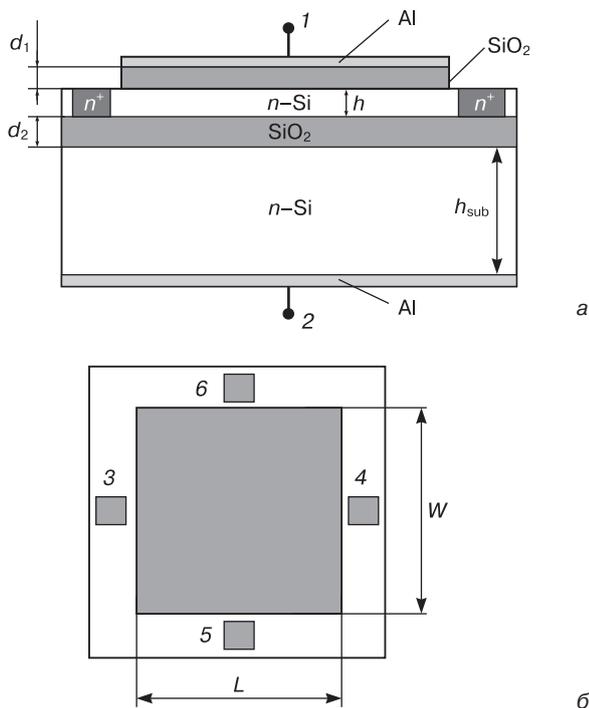


Рис. 1. Размеры и расположение элементов КНИ ПДХ: а — поперечное сечение; б — вид сверху; 1, 2 — контакты верхнего и нижнего затворов; 3, 4 — токовые (омические) контакты; 5, 6 — боковые измерительные контакты. Параметры: $h = 0,2$ мкм — толщина рабочего слоя кремния; $d_1 = 0,35$ мкм — толщина верхнего подзатворного диэлектрика, $d_2 = 0,35$ мкм — толщина скрытого диэлектрика КНИ структуры; $h_{sub} = 400$ мкм — толщина подложки; $L = 500$ мкм — длина кремниевого канала; $W = 500$ мкм — ширина кремниевого канала

Fig. 1. Dimensions and arrangement of SOI FHS elements: (a) cross-section and (b) top view; (1 and 2) top and bottom gate contacts; (3 and 4) current (Ohmic) contacts and (5 and 6) side Hall probes. Parameters: $h = 0.2 \mu\text{m}$ is the working silicon layer thickness, $d_1 = 0.35 \mu\text{m}$ is the top gate dielectric thickness, $d_2 = 0.35 \mu\text{m}$ is the SOI structure buried dielectric layer thickness, $h_{sub} = 400 \mu\text{m}$ is the substrate thickness, $L = 500 \mu\text{m}$ is the silicon channel length and $W = 500 \mu\text{m}$ is the silicon channel width

личного рода физических, химических и биологических сенсоров [8—10]. Преимуществами использования структур КНИ в датчиках, по сравнению с объемными подложками, являются прежде всего повышение рабочих температур элементов вследствие уменьшения токов утечки и появление новых функциональных возможностей.

КНИ МОП полевые транзисторы имеют, как правило два затвора. Один — управляет концентрацией носителей тока в канале, а второй, со стороны подложки, заземлен. Особенностью полностью обедняемых КНИ МОП транзисторов является эффект зарядовой связи (*coupling-effect*), заключающийся во взаимосвязи потенциалов границ раздела тонкой пленки Si, в которой формируется прибор, с окружающими ее диэлектриками [11—14]. Результатом такого эффекта может являться зависимость проводимости слоев КНИ как от напряжения на управ-

ляющем затворе транзисторов, так и от напряжения, поданного на металлизированную подложку.

Целью данной работы является изучение влияния напряжений на затворе в полевом датчике Холла (ПДХ), представляющим собой двухзатворный КНИ МОП магниточувствительный тонкопленочный транзистор с измерительными контактами на боковых противоположных сторонах встроенного n -Si канала, величину напряжения Холла. КНИ ПДХ работает в режиме аккумуляции электронов на границах интерфейсов Si— SiO_2 , разделенных областью частичного обеднения.

Объект исследования

ПДХ подробно описан в работах [15, 16]. Структуры КНИ, использованные при изготовлении ПДХ, созданы методом имплантации ионов кислорода в кремниевую пластину по технологии SIMOX (*Separation by Implantation of Oxygen*). Кристалл ПДХ, вырезанный из структуры КНИ имеет размеры $500 \times 500 \times 400$ мкм. Топология ПДХ создана в слое кремния КНИ структуры n -типа с концентрацией электронов $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, толщиной $0,2$ мкм, отделенной от подложки скрытым слоем SiO_2 толщиной $0,35$ мкм. Токовые и холловские контакты размером 50×50 мкм были получены легированием фосфора ионной имплантацией и отжигом до уровня 10^{20} см^{-3} на всю глубину слоя кремния. Далее на поверхности рабочего слоя кремния был выращен термический окисел толщиной $0,35$ мкм, поверх которого осаждена пленка Al. Таким образом, ПДХ имеет систему двух вертикальных затворов, с помощью которых осуществляется управление электрофизическими параметрами прибора. Конструкция ПДХ схематично представлена на рис. 1.

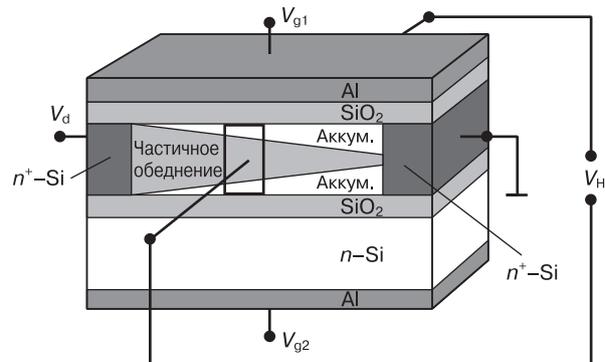


Рис. 2. Схематическое изображение ПДХ и пояснение его режима работы: V_d — напряжение питания ПДХ; V_{g1} , V_{g2} — потенциалы верхнего и нижнего затворов ПДХ, соответственно; V_H — величина регистрируемого напряжения Холла на измерительных холловских контактах

Fig. 2. FHS schematic and working principle explanation: V_d is the FHS power voltage, V_{g1} and V_{g2} are the top and bottom FHS gate bias, respectively, and V_H is the Hall voltage read at the Hall probes

Рабочим режимом ПДХ является режим аккумуляции электронов у границ разделов Si—SiO₂ и частичного обеднения Si канала между аккумулярованными областями пленки Si. Пояснение режима работы приведено на рис. 2 [17].

Результаты и их обсуждение

В работе изучались токовые и холловские передаточные характеристики ПДХ в зависимости от режима включения затворов, при которых изменяемый потенциал подавался на каждый из затворов по-отдельности, а другой затвор находился под нулевым потенциалом, либо при которых равный потенциал подавался на оба затвора одновременно. Экспериментальные зависимости, полученные при

комнатной температуре и индукции магнитного поля 50 мТл, приведены на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что подача равного потенциала V_g на оба затвора увеличивает значение напряжения Холла V_H почти до двух раз относительно включения каждого из затворов по-отдельности в исследованном диапазоне напряжений V_g . Можно заметить также, что ток I в канале ПДХ повышается более чем в два раза при включении двух затворов. При этом для всех исследованных напряжений затворов, отношение тока канала при двухзатворном включении к току при однозатворном включении в два раза выше соответствующих отношений напряжений Холла. Последнее видно из результатов, приведенных в таблице. В ней обозначения I_{2g} и I_g соответствуют току канала, полученному при подаче потенциала V_g

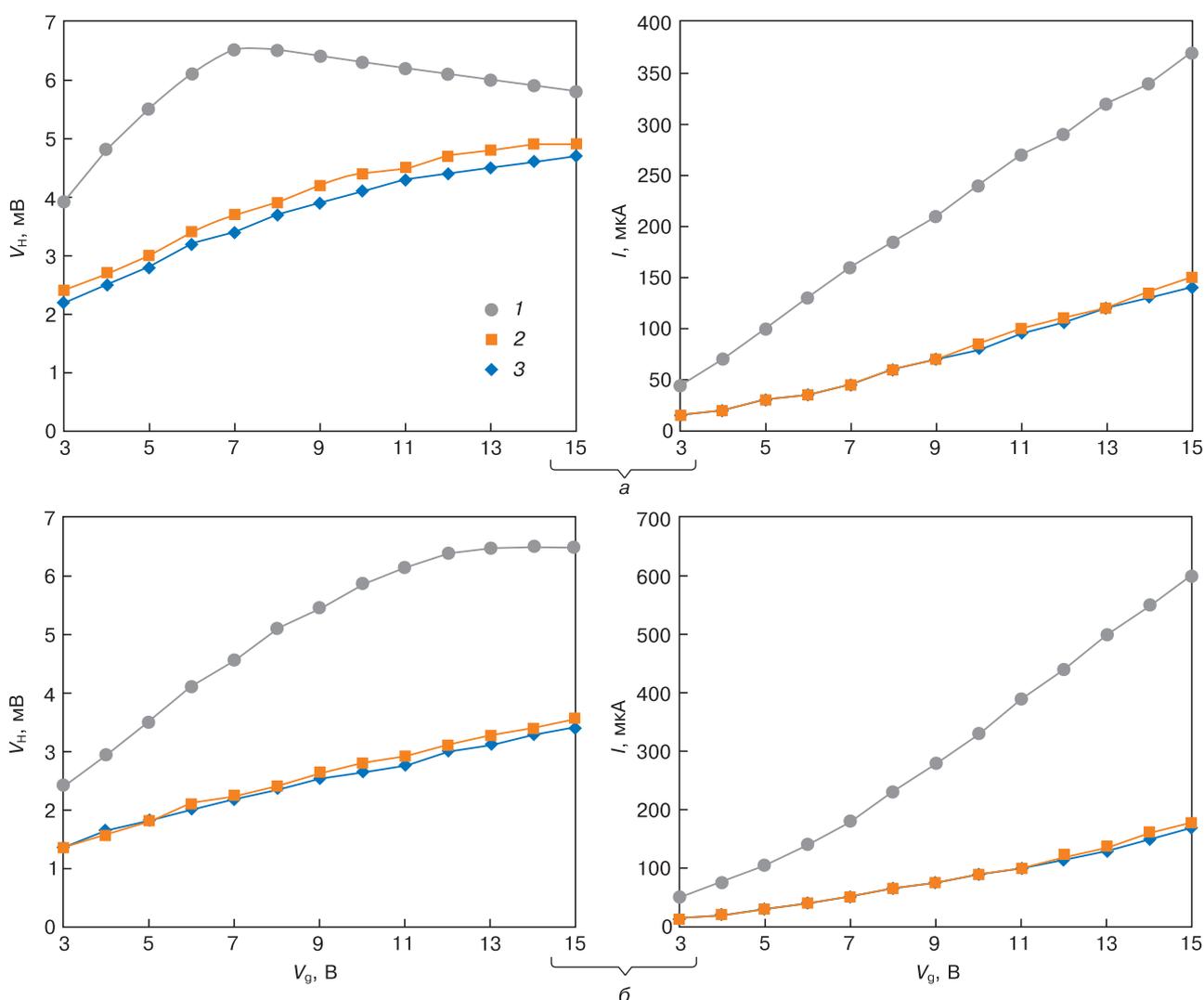


Рис. 3. Зависимости напряжения Холла и тока канала от потенциалов V_g затворов при различных конфигурациях их включения и различных напряжениях питания V_d ПДХ, $B = 50$ мТл:

а: $V_d = 5$ В; 1 — $V_g = V_{g1}$, $V_{g2} = 0$ В; 2 — $V_g = V_{g2}$, $V_{g1} = 0$ В; 3 — $V_g = V_{g1} = V_{g2}$;

б: $V_d = 10$ В; 1 — $V_g = V_{g1}$, $V_{g2} = 0$ В; 2 — $V_g = V_{g2}$, $V_{g1} = 0$ В; 3 — $V_g = V_{g1} = V_{g2}$

Fig. 3. Hall voltage and channel current dependences on gate bias V_g for different gate bias modes and different FHS power voltages V_d at $B = 50$ mT:

(a): $V_d = 5$ V; (1) $V_g = V_{g1}$, $V_{g2} = 0$ V; (2) $V_g = V_{g2}$, $V_{g1} = 0$ V; (3) $V_g = V_{g1} = V_{g2}$;

(б): $V_d = 10$ V; (1) $V_g = V_{g1}$, $V_{g2} = 0$ V; (2) $V_g = V_{g2}$, $V_{g1} = 0$ V; (3) $V_g = V_{g1} = V_{g2}$

Соотношения токов канала ПДХ и напряжений Холла при различных вариантах включения затворов [FHS channel current and Hall voltage ratios for different gate bias modes]

$V_d, \text{В}$	$V_g, \text{В}$	I_{2g}/I_g	V_{H2g}/V_{Hg}
5	3	3,0	1,6
5	5	3,3	1,8
5	7	3,6	1,7
5	9	3,0	1,4
5	12	2,8	1,4
5	15	2,6	1,3
10	3	3,3	1,7
10	5	3,5	1,7
10	7	3,9	2,0
10	9	4,0	2,0
10	12	3,9	2,0
10	15	3,8	1,9

на оба затвора вместе, либо только на один из них, соответственно. Аналогично обозначения V_{H2g} и V_{Hg} соответствуют напряжению Холла, индуцируемому при подаче потенциала V_g на оба затвора вместе, либо только на один из них, соответственно.

Описанное выше может быть объяснено влиянием эффекта зарядовой связи между затворами полевой управляющей системы ПДХ при использовании двухзатворного включения. В работе [18] показано, что в подобном КНИ МОП транзисторе, функционирующем в режиме аккумуляции электронов вблизи интерфейсов происходит смещение центроида заряда в объем канала КНИ. Причем подвижность носителей заряда в объеме материала всегда больше, чем вблизи границы раздела $\text{SiO}_2\text{—Si}$.

Для транзистора холловского типа, которым является ПДХ, это может объяснять повышение напряжения Холла при двухзатворном включении по сравнению с однозатворным, поскольку уменьшается вклад рассеяния электронов на поверхностных состояниях и увеличивается эффективная подвижность электронов в канале (хорошо известно, что э.д.с. Холла прямо пропорциональна подвижности носителей [19]). Наблюдаемое на рис. 3 уменьшение холловского сигнала в ситуации, когда потенциал затворов превышает по величине напряжение питания канала, обусловлено влиянием поперечного электрического поля на подвижность электронов [20].

Что касается тока канала, то в данном случае следует учесть, что ПДХ содержит два параллельно включенных элемента холловского типа (см. рис. 2). Соответственно, вклад в ток канала дает как уве-

личение концентрации носителей в аккумуляированных слоях у верхней и нижней границ раздела $\text{SiO}_2\text{—Si}$, так и повышение подвижности электронов в каждом из токопроводящих слоев.

Заключение

В работе показано, что в полевом элементе Холла на основе тонкопленочного КНИ МОП транзистора, работающим в режиме аккумуляции электронов на границах интерфейсов Si—SiO_2 , эффект зарядовой связи повышает абсолютную магнитную чувствительность, и это позволяет создавать датчики магнитного поля основе транзисторов, изготовленных на структуре «кремний на изоляторе». Такие датчики могут быть использованы в условиях окружающей среды с повышенной температурой и радиацией.

Библиографический список

- Huijsing J. H. Smart Sensor System: Why? Where? Now? // In: Smart Sensor System. Ed by G. C. M. Meijer. John Wiley & Sons, Ltd, 2008. P. 1—21. DOI: 10.1002/9780470866931.ch1
- Magnetic field sensor market will be worth \$2.9 billion by 2020. URL: <https://intelligencecommunitynews.com/magnetic-field-sensor-market-will-be-worth-2-9-billion-by-2020-says-report/>
- Magnetic Sensors Market Analysis By Technology. 2016. URL: <http://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/magnetic-sensors-market>
- Бараночников М. Л. Микромагнитоэлектроника. Т. 1. М.: ДМК Пресс, 2016. 544 с.
- Войтович И. Д., Корсунский В. М. Интеллектуальные сенсоры. М.: Изд-во Интуит, Бином. Лаборатория знаний, 2009. 626 с.
- Мордкович В. Н. Структуры «кремний на изоляторе» перспективный материал микроэлектроники // Материалы электронной техники. 1998. № 2. С. 4—7.
- Colinge J.-P. Silicon-on-Insulator Technology: Materials to VLSI. Boston: Springer, 2004, 366 p. (pp. 157—159). DOI: 10.1007/978-1-4419-9106-5
- Naumova O. V., Fomin B. I., Safronov L. N., Nasimov D. A., Ilnitskii M. A., Dudchenko N. V., Devyatova S. F., Zhanaev E. D., Popov V. P., Latyshev A. V., Aseev A. L. Silicon nanowire transistors for electron biosensors // Optoelectron. Instrument. Proc. 2009. V. 54, N 4. P. 287—291. DOI: 10.3103/S8756699009040013
- Naumova O. V., Fomin B. I., Nasimov D. A., Dudchenko N. V., Devyatova S. F., Zhanaev E. D., Popov V. P., Latyshev A. V., Aseev A. L., Ivanov Yu. D., Archakov A. I. SOI nanowires as sensors for charge detection // Semocond. Sci. Technol. 2010. V. 25, N 5. P. 055004. DOI: 10.1088/0268-1242/25/5/055004
- Elfström N., Juhasz R., Sychugov I., Engfeldt T., Karlström A. E., Linnros J. Surface charge sensitivity of silicon nanowires: size dependence // Nano Lett. 2007. V. 7, N 9. P. 2608—2612. DOI: 10.1021/nl0709017
- Lim H. K., Fossum J. G. Threshold voltage of thin-film Silicon-on-Insulator (SOI) MOSFET's // IEEE Transactions on Electron Devices. 1983. V. 30, Iss. 10. P. 1244—1251. DOI: 10.1109/T-ED.1983.21282
- Celler G. K. Frontiers of silicon-on-insulator // J. Appl. Phys. 2003. V. 93, Iss. 9. P. 4955. DOI: 10.1063/1.1558223
- Rudenko T., Nazarov A., Kilchytska V., Flandre D., Popov V., Ilnitsky M., Lysenko V. Revision of interface coupling in ultra-thin body silicon-on-insulator MOSFETs // Semicond. Physics, Quant. Electron & Optoelectron. 2013. V. 16, N 3. P. 300—309. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/MSMW_2013_16_3_15
- Попов В. П., Ильницкий М. А., Наумова О. В., Назаров А. Н. Квантовые поправки для пороговых напряжений полностью обедняемых КНИ-транзисторов с двумя независимыми затворами // Физика и техника полупроводников. 2014. Т. 48, № 10. С. 1348—1353.

15. Мордкович В. Н., Бараночников М. Л., Леонов А. В., Мокрушин А. Д., Омеляновская Н. М., Пажин Д. М. Полевой датчик холла — новый тип преобразователя магнитного поля // Датчики и системы. 2003. Вып. 7. С. 33—38.

16. Мокрушин А. Д., Омеляновская Н. М., Леонов А. В., Мордкович В. Н., Пажин Д. М. Радиационные эффекты в КНИ магниточувствительных элементах при различных условиях облучения // В сб.: «Радиационная стойкость электронных систем «Стойкость-2000». М.: СПЭЛС, 2000. Т. 3. С. 38—42.

17. Леонов А. В., Малых А. А., Мордкович В. Н., Павлюк М. И. Многоканальные и многофункциональные датчики физических воздействий с частотным выходом на основе универ-

сального полевого транзисторного чувствительного элемента со структурой «кремний на изоляторе» // Приборы и техника эксперимента. 2018. № 2. С. 132—138. DOI: 10.7868/S0032816218010329

18. Наумова О. В., Зайцева Э. Г., Фомин Б. И., Ильницкий М. А., Попов В. П. Зависимость подвижности электронов в режиме обогащения от их плотности в полностью обедняемых пленках кремний-на-изоляторе // Физика и техника полупроводников. 2015. Т. 49, № 10. С. 1360—1365. URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/42306>

19. Popovich R. S. Hall Effect Devices. Bristol (Philadelphia): IOP Publishing Ltd, 2004. 419 p.

20. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984. Т. 2. 453 с.

Статья поступила в редакцию 16 февраля 2021 г.

Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering. 2021, vol. 24, no. 1, pp. 57—62.
DOI: 10.17073/1609-3577-2021-1-57-62

Charge-coupling effect in a Hall field element based on thin-film SOI-MOS transistor

A. V. Leonov¹, V. N. Murashev², D. N. Ivanov^{2,§}, V. D. Kirilov²

¹ *Institute of Microelectronics Technology and High Purity Materials, Russian Academy of Sciences, 6 Academician Ossipyan Str., Chernogolovka, Moscow Region, 142432, Russia*

² *National University of Science and Technology MISiS, 4 Leninsky Prospekt, Moscow 119049, Russia*

Abstract. The influence of the coupling effect on the parameters of field Hall elements based on thin-film MOS transistors has been studied. Analysis of the development of today's microelectronics shows the necessity of developing the element base for high performance sensors based on silicon technologies. One way to significantly improve the performance of sensing elements including magnetic field sensors is the use of thin-film transistors on the basis of silicon on insulator (SOI) structures. It has been shown that field Hall sensors (FHS) may become the basis of high-performance magnetic field sensors employing the coupling effect occurring in the double gate vertical topology of these sensing elements. Electrophysical studies of FHS have been conducted for different gate bias and power supply modes. The results show that the coupling effect between the gates occurs in FHS if the thickness of the working layer between the gates is 200 nm. This effect leads to an increase in the effective carrier mobility and hence an increase in the magnetic sensitivity of the material. Thus field Hall elements based on thin-film transistors fabricated using silicon technologies provide for a substantial increase in the magnetic sensitivity of the elements and allow their application in highly reliable magnetic field sensors.

Keywords: charge coupling, transistor, Hall field sensor, magnetic field sensor

References

1. Huijsing J. H. Smart Sensor System: Why? Where? Now? In: *Smart Sensor System*. Ed by G. C. M. Meijer. John Wiley & Sons, Ltd, 2008, pp. 1—21. DOI: 10.1002/9780470866931.ch1

2. Magnetic field sensor market will be worth \$2.9 billion by 2020. URL: <https://intelligencecommunitynews.com/magnetic-field-sensor-market-will-be-worth-2-9-billion-by-2020-says-report/>

3. Magnetic Sensors Market Analysis By Technology. 2016. URL: <http://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/magnetic-sensors-market>

4. Baranochnikov M. L. *Mikromagnitoelektronika* [Micromagneto-electronics]. Vol. 1. Moscow: DMK Press, 2016, 544 p. (In Russ.)

5. Voitovich I. D., Korsunskii V. M. *Intellektual'nye sensory* [Intellectual sensors]. M.: Izd-vo Intuit, Binom. Laboratoriya znaniy, 2009. 626 p. (In Russ.)

6. Morokovich V. N. Structures "silicon-on-insulator" a promising material for microelectronics. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Materialy Elektronnoi Tekhniki = Materials of Electronics Engineering*, 1998, no. 2, pp. 4—7. (In Russ.)

7. Colinge J.-P. Silicon-on-Insulator Technology: Materials to VLSI. Boston: Springer, 2004, 366 p. (pp. 157—159). DOI: 10.1007/978-1-4419-9106-5

8. Naumova O. V., Fomin B. I., Safronov L. N., Nasimov D. A., Ilitskii M. A., Dudchenko N. V., Devyatova S. F., Zhanaev E. D., Popov V. P., Latyshev A. V., Aseev A. L. Silicon nanowire transistors for electron biosensors. *Optoelectron. Instrument. Proc.*, 2009, vol. 54, no. 4, pp. 287—291. DOI: 10.3103/S8756699009040013

9. Naumova O. V., Fomin B. I., Nasimov D. A., Dudchenko N. V., Devyatova S. F., Zhanaev E. D., Popov V. P., Latyshev A. V., Aseev A. L., Ivanov Yu. D., Archakov A. I. SOI nanowires as sensors for charge detection. *Semicond. Sci. Technol.*, 2010, vol. 25, no. 5, p. 055004. DOI: 10.1088/0268-1242/25/5/055004

Information about authors:

Aleksey V. Leonov¹: Cand. Sci. (Phys.-Math.), Researcher (alex25.08@mail.ru); **Victor N. Murashev²:** Dr. Sci. (Eng.), Professor (vnmurashev@mail.ru); **Dmitry N. Ivanov^{2,§}:** Postgraduate Student (ivanovdmity@rocketmail.com); **V. D. Kirilov²**

§ Corresponding author

10. Elfström N., Juhasz R., Sychugov I., Engfeldt T., Karlström A. E., Linnros J. Surface charge sensitivity of silicon nanowires: size dependence. *Nano Lett.*, 2007, vol. 7, no. 9, pp. 2608—2612. DOI: 10.1021/nl0709017
11. Lim H. K., Fossum J. G. Threshold voltage of thin-film Silicon-on-insulator (SOI) MOSFET's. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1983, vol. 30, no. 10, pp. 1244—1251. DOI: 10.1109/TE.1983.21282
12. Celler G. K. Frontiers of silicon-on-insulator. *J. Appl. Phys.*, 2003, vol. 93, no. 9, p. 4955. DOI: 10.1063/1.1558223
13. Rudenko T., Nazarov A., Kilchytska V., Flandre D., Popov V., Ilnitsky M., Lysenko V. Revision of interface coupling in ultra-thin body silicon-on-insulator MOSFETs. *Semicond. Physics, Quant. Electron & Optoelectron.*, 2013, vol. 16, no. 3, pp. 300—309. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/MSMW_2013_16_3_15
14. Popov V. P., Ilnitsky M. A., Naumova O. V., Nazarov A. N. Quantum corrections to threshold voltages for fully depleted SOI transistors with two independent gates. *Semiconductors*, 2014, vol. 48, no. 10, pp. 1312—1317. DOI: 10.1134/S1063782614100248
15. Mordkovich V. N., Baranochnikov M. L., Leonov A. V., Mokrushin A. D., Omelianovskaya N. M., Pazhin D. M. Field Hall device — a new type of magnetic field transducer. *Datchiki i sistemy = Sensors and Systems*, 2003, no. 7, pp. 33—38. (In Russ.)
16. Mokrushin A. D., Omelyanovskaya N. M., Leonov A. V., Mordkovich V. N., Pazhin D. M. Radiation effects in SOI magnetosensitive elements under different irradiation conditions. In: *Scientific and technical collection. Radiation resistance of electronic systems "Resistance-2000"*. Moscow: SPELS, 2000, vol. 3, pp. 38—42. (In Russ.)
17. Leonov A. V., Malykh A. A., Mordkovich V. N., Pavlyuk M. I. Multichannel and multifunctional frequency-output sensors of physical effects based on a universal field transistor-type sensing element with a silicon-on-insulator structure. *Instrum. Exp. Tech.*, 2018, vol. 61, no. 2, pp. 299—305. DOI: 10.1134/S002044121801027X
18. Naumova O. V., Zaitseva E. G., Fomin B. I., Ilnitsky M. A., Popov V. P. Density dependence of electron mobility in the accumulation mode for fully depleted SOI films. *Semiconductors*, 2015, vol. 49, no. 10, pp. 1316—1322. DOI: 10.1134/S106378261510017
19. Popovich R. S. *Hall Effect Devices*. Bristol (Philadelphia): IOP Publishing Ltd, 2004. 419 p.
20. Sze S. M. *Physics of Semiconductor Devices*. Wiley-Interscience, 1981, 880 p.

Received February 16, 2021

* * *