

Приборно-технологическое моделирование ВАХ и зарядового состояния КНИ полевого датчика Холла

М.А. Королёв, А.В. Козлов, А.Ю. Красюков, С.С. Девликанова

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
г. Москва, Россия*

petrunina.s@mail.ru

Датчики Холла широко применяются для измерения индукции магнитного поля, бесконтактного определения механических и электрических воздействий. Для многофакторного анализа приборных характеристик полевого датчика Холла на основе КНИ-структуры (КНИ ПДХ) целесообразно использовать современные методы математического моделирования.

Средствами приборно-технологического моделирования Synopsys TCAD проведен расчет выходных и передаточных характеристик двумерной модели КНИ ПДХ. Получены двумерные распределения концентрации электронов, электрического поля и плотности тока в канале КНИ ПДХ в трех типовых режимах работы датчика – полного обеднения, неполного обеднения и обогащения. Полученные результаты хорошо совпадают с экспериментальными данными и подтверждают физическую модель КНИ ПДХ и особенности работы прибора в области неполного обеднения, при котором образуется проводящий канал в теле КНИ ПДХ.

Результаты исследования позволяют детально изучать особенности функционирования КНИ ПДХ.

Ключевые слова: полевой датчик Холла на КНИ (КНИ ПДХ); повышенная магниточувствительность; режим неполного обеднения и обогащения; ВАХ; зарядовое состояние; приборно-технологическое моделирование.

Для цитирования: Королёв М.А., Козлов А.В., Красюков А.Ю., Девликанова С.С. Приборно-технологическое моделирование ВАХ и зарядового состояния КНИ полевого датчика Холла // Изв. вузов. Электроника. – 2017. – Т.22. – №3. – С. 231–237.

Instrument-Process Simulation of Current-Voltage Characteristics and Charge State of SOI Field-Effect Hall Sensor

M.A. Korolev, A.V. Kozlov, A.Y. Krasukov, S.S. Devlikanova

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

petrunina.s@mail.ru

For multi-factor analysis of instrument characteristics of the field-effect Hall sensor on the SOI structure (SOI FEHS), by means of the TCAD simulation, the calculation of the output and transfer characteristics of SOI FEHS) two-dimensional model has been performed. The two-dimensional distributions of electrons of electric field and the current density in the SOI FEHS channel have been obtained in three typical modes of the sensor operation – full depletion, partial depletion and saturation.

The obtained results are in good agreement with the experimental data and confirm the physical model of SOI FEHS, described above, and specific features of the instrument operation in the partial depletion region, when the conductive channel in SOI FEHS body is formed.

Keywords: SOI field-effect Hall sensor (SOI FEHS); increased magnetic sensitivity; the partial depletion mode and the saturation; the current-voltage characteristics (CVC); charge state; mathematical model.

For citation: Korolev M.A., Kozlov A.V., Krasukov A.Y., Devlikanova S.S. Instrument-Process Simulation of Current-Voltage Characteristics and Charge State of SOI Field-Effect Hall Sensor // Proc. of universities. Electronics. – 2017. – Vol.22. – №3. – P. 231–237.

Введение. Полевые датчики Холла на основе КНИ-структуры (КНИ ПДХ) характеризуются наличием двух управляющих электродов [1–3]. Для проведения многофакторного анализа приборных характеристик КНИ ПДХ целесообразно использовать современные методы математического моделирования, чтобы избежать больших временных затрат. Анализ научно-технической литературы показал, что публикаций, посвященных математическому моделированию КНИ ПДХ, мало.

Разработка математической модели КНИ ПДХ. На точность моделирования влияет правильный выбор математической модели для описания технологических процессов и электрофизических параметров областей полученных структур. Полевой датчик Холла имеет крестовидную топологию, поэтому расчет электрических ВАХ, связанных с распределением носителей заряда при отсутствии или под воздействием магнитного поля, в том числе для получения холловской ЭДС в магнитном поле, возможен только при математическом моделировании трехмерной структуры. Однако для исследований ВАХ прибора, распределения электронов и электрического поля в канале КНИ ПДХ можно ограничиться созданием двумерной модели датчика в Synopsys TCAD, не учитывающей пространственное распределение областей прибора.

На начальном этапе в Synopsys TCAD проводится сопоставление передаточных характеристик полученного реального образца [2] и рассчитанной с помощью TCAD [4]. Разработана двумерная математическая модель (рис.1), учитывающая результаты измерений опытных образцов.

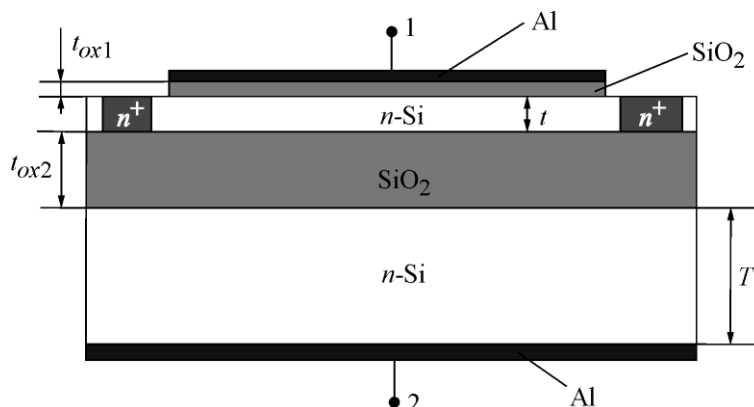


Рис.1. Поперечное сечение КНИ ПДХ (1, 2 – контакты верхнего и нижнего затворов; t – толщина рабочего слоя кремния; t_{ox1} – толщина верхнего подзатворного диэлектрика; t_{ox2} – толщина скрытого диэлектрика КНИ-структуры; T – толщина подложки)

В качестве подложки выбран кремний, легированный донорной примесью с постоянной концентрацией 10^{16} см^{-3} , толщина подложки $T = 250 \text{ мкм}$. На нижней поверхности подложки сформирован управляющий алюминиевый контакт нижнего затвора 2, на верхнюю поверхность подложки нанесен изолирующий слой SiO_2 толщиной $t_{ox2} = 0,4 \text{ мкм}$. На изолирующем оксиде кремния SiO_2 структуры сформирован рабочий слой $n\text{-Si}$ длиной 80 мкм , шириной 30 мкм и толщиной $0,2 \text{ мкм}$ с постоянной концентрацией примеси фосфора 10^{16} см^{-3} . По краям слоя $n\text{-Si}$ сформированы омические контакты $n^+\text{-Si}$ длиной 10 мкм со спадающей концентрацией донорной примеси с 10^{20} до 10^{16} см^{-3} . На рабочий слой $n\text{-Si}$ нанесен подзатворный диэлектрик SiO_2 толщиной $t_{ox1} = 0,1 \text{ мкм}$, на котором сформирован алюминиевый контакт верхнего затвора 1.

Структура прибора на основе сечения, показанного на рис.1, задавалась аналитически в программе Sentauros SDE. С помощью данной программы формировались слои, указывалась концентрация примеси в них, наносились контакты, а также осуществлялось построение расчетной сетки для последующего расчета физических параметров прибора.

Проводилась следующая настройка математической модели. Для расчетов ВАХ и электрофизических параметров областей приборов в модуле SDEVICE применялись модели DopingDep и Enormal, учитывающие зависимость подвижности носителей заряда от концентрации примеси и поперечного электрического поля. Параметры указанных моделей использовались по умолчанию и отдельно не уточнялись. Задавался барьер между уровнем Ферми металла, т.е. верхним электродом затвора, и уровнем Ферми кремния, т.е. рабочим слоем, через тонкий подзатворный диэлектрик. Концентрация поверхностных состояний, вызванных поверхностным зарядом на границе Si/SiO_2 , задавалась равной 10^{11} см^{-3} . С помощью итерационного метода проводилось изменение функции по изменению аргумента. Построение передаточных и выходных ВАХ осуществлялось в модуле INSPECT.

Сравнение экспериментальной и расчетной передаточных характеристик дает хорошее совпадение [5]. Это свидетельствует об адекватности разработанной математической модели реальному образцу прибора.

Моделирование ВАХ КНИ ПДХ. Расчет выходной ВАХ КНИ ПДХ проводился при отсутствии внешнего магнитного поля на основе решения уравнений непрерывности для электронов и дырок, а также уравнения Пуассона в рамках диффузионно-

дрейфовой модели. В качестве начального условия на электроды стока, истока, верхнего и нижнего затворов подавались нулевые потенциалы. Выбрана схема включения прибора с общим электродом истока, т.е. потенциал электрода стока возрастал до напряжения $U_{СИ} = 10$ В. Семейство рассчитанных выходных характеристик при разных напряжениях затвор-исток $U_{ЗИ}$ приведено на рис.2.

Расчет передаточной ВАХ КНИ ПДХ при различном напряжении сток-исток проводился при отсутствии внешнего магнитного поля на основе решения тех же уравнений, что и для выходной ВАХ КНИ ПДХ. В качестве начального условия на электроды истока, нижнего затвора подавались нулевые потенциалы. На сток подавалось напряжение 2 В, на верхний затвор -3 В. В процессе расчетов напряжение верхнего электрода $U_{ЗИ}$ изменялось от -10 В до 10 В. Выбрана схема включения транзистора с общим электродом истока. На рис.3 представлено семейство передаточных характеристик при разных напряжениях сток-исток. Видно, что по мере возрастания напряжения сток-исток $U_{СИ}$ ток стока I_C в режиме обогащения возрастает в положительной области значений $U_{ЗИ}$. Расчетные ВАХ КНИ ПДХ имеют хорошее совпадение с экспериментальными характеристиками, приведенными в работе [2].

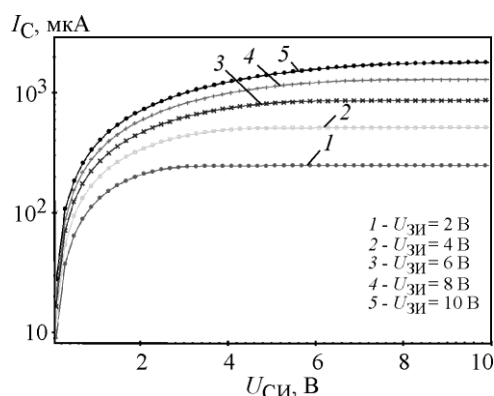


Рис.2. Семейство рассчитанных выходных характеристик КНИ ПДХ в зависимости от напряжения затвор-исток

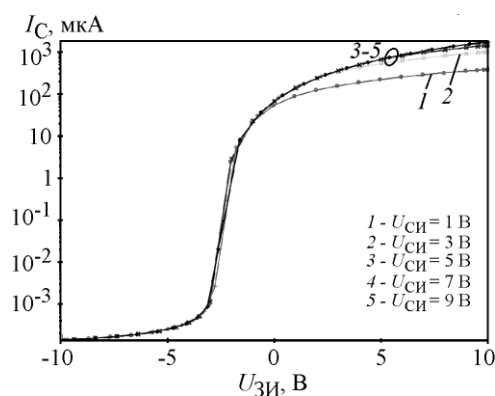


Рис.3. Семейство передаточных ВАХ КНИ ПДХ при различном напряжении сток-исток

Моделирование зарядового состояния КНИ ПДХ. В работе [6] на основе предложенной физической модели КНИ ПДХ показано, что в зависимости от напряжения на затворе КНИ ПДХ может работать в различных режимах, выбор которых обусловлен областью применения прибора. Поэтому при расчете зарядового состояния КНИ ПДХ выбраны значения $U_{ЗИ}$, равные -10 ; -2 ; 2 В, что соответствует работе прибора в режиме полного обеднения, неполного обеднения и обогащения при концентрации примеси в рабочем слое 10^{16} см^{-3} . На основе выбранных базовых параметров получены двумерные распределения концентрации электронов в канале КНИ ПДХ, электрического поля, плотности тока и соответствующие им профили.

Моделирование зарядового состояния КНИ ПДХ проводилось с помощью Synopsys TCAD с использованием модуля SDEVICE, построение распределений – с помощью SVISUAL.

На рис.4,а приведено распределение концентрации электронов в поперечном сечении канала датчика при выбранных параметрах. При построении профиля взяты три значения напряжения $U_{ЗИ}$ на затворе. Напряжение на стоке $U_{СИ}$ базовое и равно 2 В. Распределения построены в центре длины канала датчика.

Как следует из рис.4,а, по мере увеличения напряжения на затворе в сторону положительных значений концентрация электронов в теле датчика возрастает. Неравномерность распределения электронов в сечении тела датчика в режимах обеднения обусловлена влиянием напряжения на затворе на этот процесс. В случае режима обогащения электроны в основном сосредоточены на поверхности кремниевой пленки, а при неполном обеднении – в объеме полупроводника.

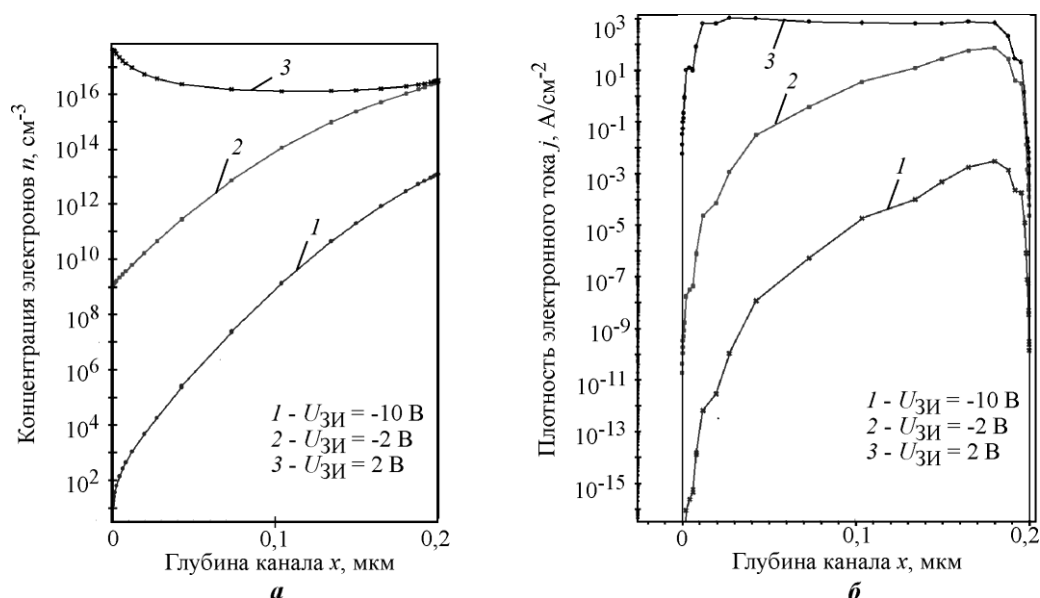


Рис.4. Поперечный профиль распределения концентрации электронов (а) и плотности тока (б) в канале КНИ ПДХ при различном напряжении на затворе

На рис.4,б приведено распределение плотности электронного тока в поперечном сечении канала КНИ ПДХ при тех же напряжениях на затворе и на стоке в том же сечении. Спад плотности электронного тока на границах раздела полупроводник–диэлектрик (при $x = 0$ граница раздела подзатворный диэлектрик–полупроводник канала, при $x = 0,2$ мкм – полупроводник канала–скрытый оксид) обусловлен возникновением областей пространственного заряда на этих участках структуры. В режиме неполного обеднения ток прибора в основном определяется проводимостью объема тела датчика.

На рис.5,а приведено продольное распределение электрического поля в канале КНИ ПДХ на глубине $x = 0,005$ мкм (вблизи подзатворного диэлектрика). По оси абсцисс отложено расстояние от границы раздела исток–канал при $l = 0$ до границы раздела канал–сток при $l = 60$ мкм. Видно, что в режимах обеднения электрическое поле практически не меняется на протяжении длины канала датчика, а в случае обогащения наблюдается спад кривой вследствие влияния потенциала на стоке.

На рис.5,б приведено распределение электрического поля вдоль длины канала КНИ ПДХ на глубине $x = 0,1$ мкм (посередине канала КНИ ПДХ). Как следует из приведенных графиков, в случае режима обеднения электрическое поле практически не меняется, а при режиме обогащения резко уменьшается по всей длине канала датчика вследствие малого влияния напряжения на затворе.

На рис.5,в приведено распределение электрического поля в сечении по длине канала КНИ ПДХ на глубине $x = 0,19$ мкм (вблизи границы раздела диэлектрик – полупроводник скрытого окисла) в зависимости от расстояния от границы раздела исток–канал

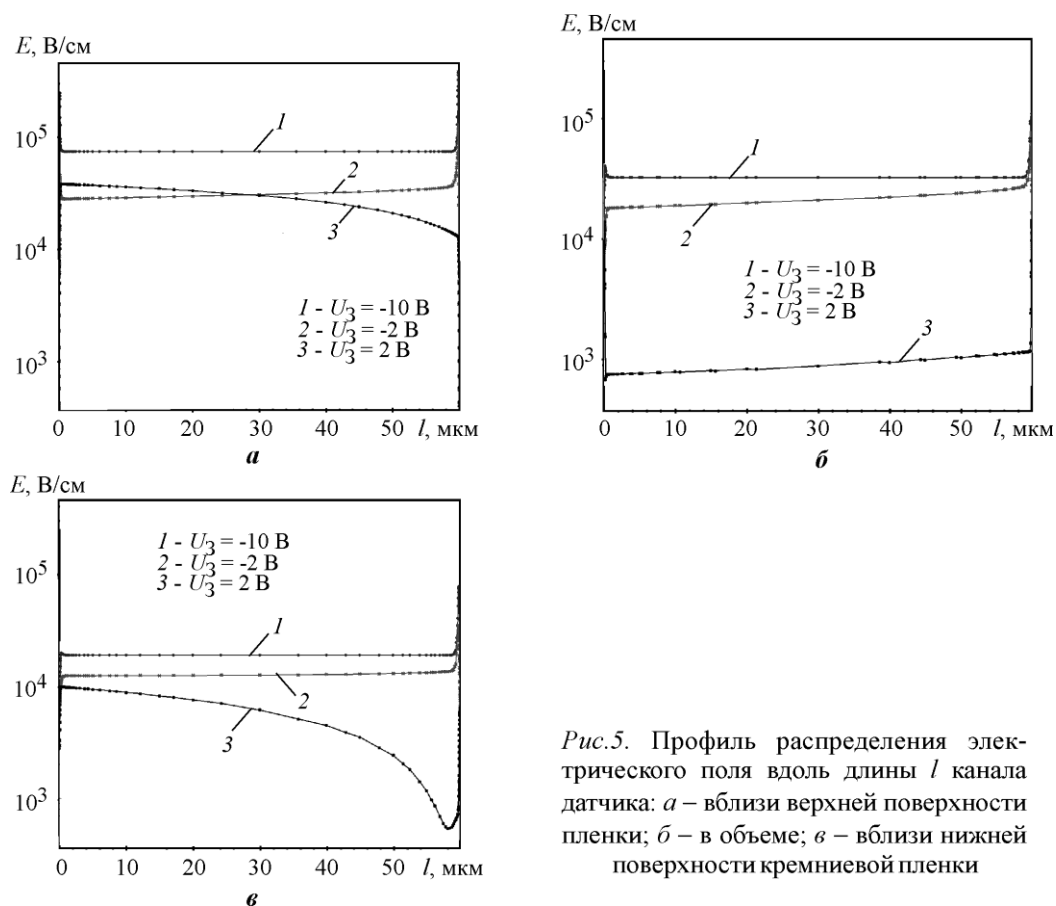


Рис.5. Профиль распределения электрического поля вдоль длины l канала датчика: а – вблизи верхней поверхности пленки; б – в объеме; в – вблизи нижней поверхности кремниевой пленки

при $l = 0$ до границы раздела канал–сток при $l = 60$ мкм. Из рисунка следует, что в режиме обогащения происходит резкое уменьшение электрического поля под влиянием потенциала стока из-за малого электрического поля нижнего затвора вследствие большой толщины подзатворного диэлектрика. В режиме обеднения электрическое поле практически не меняется вдоль канала датчика.

Заключение. Разработанная методика математического моделирования построения выходных и передаточных характеристик КНИ ПДХ и профилей распределения электронов и электрических полей в сечении КНИ ПДХ в трех типовых режимах работы датчика позволяет детально изучать особенности функционирования КНИ полевого ДХ. Полученные результаты подтверждают физическую модель, предложенную в работе [5].

Литература

1. Some features of magnetometric and sensor devices based on the field effect hall sensor / **М.Л. Бараночников, А.В. Леонов, В.Н. Мордкович et al.** // Advanced Electromagnetics Symposium. Proceedings. – Paris, 2012. – P. 455–459.
2. Полевой датчик Холла – новый тип преобразователя магнитного поля / **В.Н. Мордкович, М.Л. Бараночников, А.В. Леонов и др.** // Датчики и системы. – 2003. – Вып. 7. – С.33–38.
3. **Королёв М.А., Козлов А.В., Петрунина С.С.** Особенности функционирования полевого датчика Холла на основе КНИ структур, предназначенного для работы в телекоммуникационных сетях // Труды МФТИ. – 2015. – Т. 7. – № 3. – С. 91–95.
4. **Королёв М.А., Крупкина Т.Ю., Чаплыгин Ю.А.** Приборно-технологическое моделирование при разработке изделий микроэлектроники и микросистемной техники // Изв. вузов. Электроника. – 2005. – №4-5. – С. 64–71.

5. Козлов А.В., Королёв М.А., Петрунина С.С. Математическое моделирование влияния концентрации примеси на величину тока стока КНИ полевого датчика Холла // Изв. вузов. Электроника. – 2015. – Т. 20. – №4. – С. 377–381.

6. Королёв М.А., Павлюк М.И., Девликанова С.С. Физическая модель полевого датчика Холла на основе КНИ-структуры // Изв. вузов. Электроника. – 2016. – Т. 22. – № 2 – С. 166–170.

Поступила 17.03.2017 г.; принята к публикации 21.03.2017 г.

Королёв Михаил Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры интегральной электроники и микросистем (ИЭМС) МИЭТ, заместитель декана факультета электроники и компьютерных технологий МИЭТ (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1).

Козлов Антон Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры ИЭМС МИЭТ (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1).

Красюков Антон Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры ИЭМС МИЭТ (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1).

Девликанова Светлана Сергеевна – аспирант кафедры ИЭМС МИЭТ (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), petrunina.s@mail.ru

References

1. Baranochnikov M. L., Leonov A. V., Mordkovich V. N., Pazhin D. M. Filatov M. M. Some features of magnetometric and sensor devices based on the field effect hall sensor. *Advanced Electromagnetics Symposium. Proceedings*. Paris, 2012. pp. 455–459.

2. Mordkovich V.N., Baranochnikov M.L., Leonov A.V., Mokrushin A.D., Omel'yanovskaya N.M., Pazhin D.M. Polevoj datchik kholla – novyj tip preobrazovatelya magnitnogo polya [Field Hall Sensor is a new type of transmitter magnetic field]. *Datchiki i sistemy – Sensors and Systems* 2003, iss. 7, pp.33–38. (In Russian).

3. Korolyov M.A., Kozlov A.V., Petrunina S.S. Osobennosti funktsionirovaniya polevogo datchika Kholla na osnove KNI struktur, prednaznachennogo dlya raboty v telekommunikatsionnykh setyakh [Functioning Features of The SOI Field-Effect Hall Sensor Designed For Application in Telecommunications Networks]. *Tr. MFTI – Proceedings of MIPT*, 2015, vol. 7, no. 3, pp. 91–95. (In Russian).

4. Korolev M.A., Krupkina T.YU., CHaplygin YU.A. Priborno-tehnologicheskoe modelirovanie pri razrabotke izdelij mikroelektroniki i mikrosistemnoj tekhniki [Device-Technological Modeling in Development of Microelectronic and Microsystems Engineering Items]. *Izvestiya vuzov. Elektronika – Proceedings of Universities. Electronic*, 2005, no. 4-5, pp. 64–71. (In Russian).

5. Kozlov A.V., Korolyov M.A., Petrunina S.S. Matematicheskoe modelirovanie vliyaniya kontsentratsii primesi na tok stoka KNI polevogo datchika KHolla [Mathematical Simulation of Doping Concentration Influence on Drain Current Value of SOI Field-Effect Hall Sensor]. *Izvestiya vuzov. Elektronika – Proceedings of Universities. Electronics*, 2015, vol.4, pp. 377–381. (In Russian).

6. Korolev M.A., Pavlyuk M.I., Devlikanova S.S. Fizicheskaya model' polevogo datchika KHolla na osnove KNI-struktury [Physical Model of SOI Field-Effect Hall Sensor]. *Izvestiya vuzov. Elektronika – Proceedings of Universities. Electronics*, 2017, vol. 22, no. 2, pp. 166–170. (In Russian).

Submitted 17.03.2017; accepted 21.03.2017.