

Влияние концентрации примеси в пленке кремния на магниточувствительность КНИ полевых датчиков Холла

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

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

petrunina.s@mail.ru

Полевые датчики Холла на основе КНИ-структуры (КНИ ПДХ) характеризуются расширенными функциональными возможностями, но невысокой магниточувствительностью. Цель настоящих исследований – поиск возможностей повышения магниточувствительности таких датчиков.

Представлены результаты исследования магниточувствительных характеристик КНИ ПДХ, полученные с использованием системы приборно-технологического моделирования Synopsys TCAD. Проведено трехмерное моделирование прибора. Получены расчетные холл-затворные характеристики КНИ ПДХ, подтверждающие ранее предложенную физическую модель датчика, в соответствии с которой при определенных условиях функционирования КНИ ПДХ возникает область повышенной магниточувствительности. Исследовано влияние концентрации примеси в рабочем канале датчика на магниточувствительность. Показано, что этот параметр КНИ ПДХ при концентрации примеси фосфора в рабочем слое $N_p = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ возрастает в три раза.

Расширенный динамический диапазон области повышенной магниточувствительности (более 5 В) позволяет увеличить область практического применения датчика, повысив его помехоустойчивость. Полученные расчетные характеристики КНИ ПДХ соответствуют ранее опубликованным параметрам экспериментальных приборов.

Ключевые слова: КНИ полевой датчик Холла (КНИ ПДХ); магниточувствительность; режим неполного обеднения и обогащения; концентрация примеси; математическое моделирование; динамический диапазон.

Для цитирования: Королёв М.А., Козлов А.В., Красюков А.Ю., Девликанова С.С. Влияние концентрации примеси в пленке кремния на магниточувствительность КНИ полевых датчиков Холла // Изв. вузов. Электроника. – 2017. – Т. 22. – № 5. – С. 433–439. DOI: 10.214151/1561-5405-2017-22-5-433-439

Influence of Doping Concentration in Silicon Film on Magnetic Sensitivity of SOI Field-Effect Hall Sensors

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

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

petrunina.s@mail.ru

The SOI field-effect Hall sensors are characterized by the enhanced functionality, but by low magnetic sensitivity. Therefore, the main task is to increase the magnetic sensitivity of such sensors.

The results of the study on magnetically sensitive electric characteristics of SOI FEHS, obtained using the TCAD system, have been presented. The three-dimensional modeling of the device has been carried out. The calculated Hall-gate characteristics of SOI FEHS, confirming the previously proposed physical model of the sensor, in accordance with which under certain conditions of SOI FEHS functioning the area of the increased magnetic sensitivity appears, have been obtained.

The influence of the doping concentration in the sensor channel on the magnetic sensitivity has been studied. It has been shown that the magnetic sensitivity of SOI FEHS is 3 times increased at the concentration of 10^{16} cm^{-3} . The extended dynamic range of the increased magnetic sensitivity area (more than 5 V) permits to increase the area of practical application of the sensor increasing the noise immunity. The obtained SOI FEHS characteristics are in good agreement with the parameters of the experimental device published earlier.

Keywords: SOI field-effect Hall sensor (SOI FEHS); magnetic sensitivity; the partial depletion mode and the saturation; the doping concentration; the mathematical modeling; the dynamic range.

For citation: Korolev M.A., Kozlov A.V., Krasukov A.Y., Devlikanova S.S. Influence of Doping Concentration in Silicon Film on Magnetic Sensitivity of SOI Field-Effect Hall Sensors // Proc. of Universities. Electronics. – 2017. – Vol. 22. – № 5. – P. 433–439. DOI: 10.214151/1561-5405-2017-22-5-433-439

Введение. КНИ полевые датчики Холла (КНИ ПДХ) характеризуются расширенными функциональными возможностями [1–3]. Одним из основных параметров датчика является магниточувствительность, которая определяется модулем напряжения Холла (ЭДС Холла):

$$|U_x| = \frac{r_n}{e n t} G B I,$$

где r_n – коэффициент пропорциональности (холл-фактор), зависящий от механизма рассеяния и пропорциональный подвижности носителей; e и n – соответственно заряд и концентрация носителей заряда; t – толщина рабочего тела; G – поправочный коэффициент на геометрию прибора; B – магнитная индукция; I – ток стока [4].

Из формулы следует, что ЭДС Холла существенно зависит от подвижности носителей заряда и их концентрации в рабочем канале датчика.

Результаты исследований, изложенные в работах [5, 6], позволили определить влияние конструктивно-технологических параметров прибора на электрические характеристики КНИ ПДХ. Однако при расчете магниточувствительности прибора необходимо учитывать не только продольную сток-истоковую составляющую потока носителей заряда, но и поперечную, обусловленную отклонением носителей под влиянием магнитного поля. Магнитная чувствительность прибора, зависящая от ЭДС Холла в магнитном поле, связана с распределением носителей заряда при отсутствии или под воздействием магнитного поля. Поэтому расчет электрических характеристик возможен только при моделировании трехмерной структуры.

В работе [7] представлена физическая модель КНИ ПДХ, подтвержденная экспериментальными результатами [2]. Показано, что область повышенной магниточувствительности (ОПМЧ) прибора возникает при работе в режимах неполного обеднения и неполного обогащения, когда канал датчика изолирован от поверхностных ловушек слоями ОПЗ на границе кремний – оксид кремния. Это обеспечивает высокое значение подвижности носителей заряда в канале. Однако, как показано в работе [2], ОПМЧ экспериментальных образцов прибора имеет протяженность менее 0,1 В в диапазоне напряжений на затворе (динамическом диапазоне ОПМЧ), что не позволяет использовать этот режим работы датчика на практике. Поэтому с целью обеспечения работы датчика в условиях максимальной магниточувствительности, а именно в режиме ОПМЧ, необходимо увеличивать ее динамический диапазон.

Цель настоящей работы – установление зависимости ЭДС Холла в ОПМЧ и ее динамического диапазона от концентрации примеси в канале датчика.

Создание трехмерной модели исследуемого КНИ ПДХ. Трехмерное моделирование структуры КНИ ПДХ (рис.1) проводилось в системе приборно-технологического моделирования Synopsys TCAD [8]. Сечение C1 соответствует двумерной модели, описанной в работе [6].

Трехмерная структурная модель прибора создавалась в программе Sentaurus SDEVICE, а именно формировались слои структуры датчика, указывалась концентрация примеси в них, формировались контакты, осуществлялось построение расчетной сетки для последующего расчета параметров прибора, проводилась настройка параметров модели. Для расчетов ВАХ и электрофизических параметров областей приборов в программе Sentaurus 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. Барьер между уровнем Ферми металла (верхним электродом затвора) и уровнем Ферми кремния (рабочим слоем) задавался через тонкий подзатворный диэлектрик. Концентрация поверхностных состояний, вызванных поверхностным зарядом на границе Si/SiO₂, задавалась равной 10^{11} см^{-3} .

Трехмерная структура строилась с помощью квадратной топологии (рис.2) с областями нижнего затвора PEPI, верхнего затвора CGATE, крестом Холла NWELL, контактами истока и стока и контактами Холла NPLUS. Сначала задавалась 1/4 часть тополо-

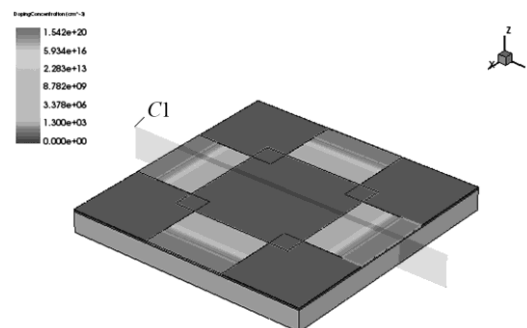


Рис.1. Структурная модель КНИ ПДХ размером 60 × 60 мкм

Fig.1. Simplified SOI field-effect Hall sensor model. Model dimensions are 60 μm at 60 μm

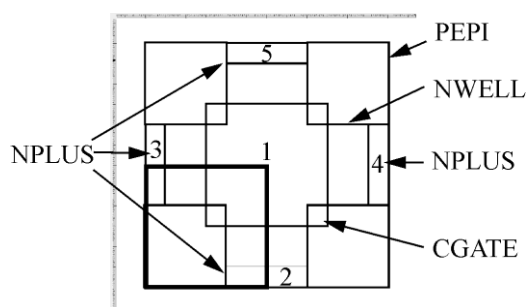


Рис.2. Топология для построения КНИ ПДХ:
1 – затвор; 2 – исток; 3, 4 – контакты Холла;
5 – сток

Fig.2. Layout for SOI field-effect Hall sensor model:
1 – gate; 2 – source; 3, 4 – Hall contacts;
5 – drain

гии (на рис.2 выделена жирным), затем путем зеркального отображения восстанавливалась вся топология датчика.

Результаты расчета. На основе разработанных структурной модели и маршрута моделирования проведен расчет и получены зависимости ЭДС Холла от напряжения на затворе КНИ ПДХ при концентрации примеси фосфора N_p в рабочем слое (рис.3), которая изменялась от 10^{15} до 10^{18} см^{-3} с шагом, равным порядку величины с дополнительным значением $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Из рис.3 следует, что при $N_p = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и более происходит резкое уменьшение ЭДС Холла, так как снижается подвижность и увеличивается

концентрация носителей заряда. При низких концентрациях примеси в пленке кремния (менее 10^{16} см^{-3}) также резко уменьшается ЭДС Холла, так как при этом уменьшается ток в тонком рабочем слое кремния, отделенном от границы раздела окисел-полупроводник двумя ОПЗ. Максимальное значение ЭДС Холла достигается при концентрации примеси $N_p = 10^{16} \text{ см}^{-3}$. С повышением концентрации примеси в канале датчика динамический диапазон ОПМЧ увеличивается из-за замедления процесса обеднения полупроводника.

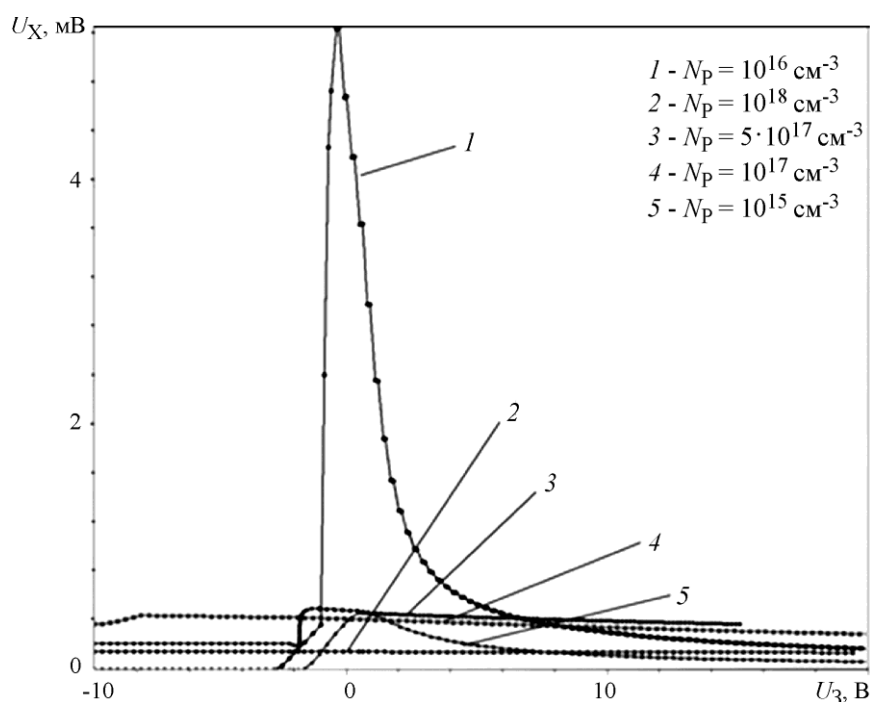


Рис.3. Зависимость ЭДС Холла от напряжения на затворе КНИ ПДХ при различной концентрации примеси фосфора в рабочем слое ($B = 60 \text{ мТл}$, $U_{\text{си}} = 2 \text{ В}$)

Fig.3. Dependence of the Hall voltage vesus the gate-source voltage at different substrate concentrations for SOI field-effect Hall sensor ($B = 60 \text{ мТл}$, $U_{\text{DS}} = 2 \text{ В}$)

Анализ рис.3 позволяет построить зависимости пика ЭДС Холла и динамического диапазона ОПМЧ от концентрации примеси в рабочем слое КНИ ПДХ (рис.4). Из рис.4 следует, что максимальное значение ЭДС Холла, а соответственно, и магниточувствительности достигается при работе в ОПМЧ и концентрации примеси в рабочем слое $N_p = 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Динамический диапазон ОПМЧ при этой концентрации примеси достаточно широк и удобен для практического применения.

Проанализировано поведение холл-затворных характеристик при приложении разного магнитного поля B (от 0 до 150 мТл) для уровней легирования канала датчика $10^{14} - 10^{17} \text{ см}^{-3}$. На рис.5 приведены графики для концентрации примеси в канале прибора $N_p = 10^{16} \text{ см}^{-3}$, при которой наблюдается максимальная магниточувствительность датчика. Обработка графиков позволяет построить зависимость ЭДС Холла от магнитного поля при концентрации примеси в канале датчика $N_p = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (рис.6). Зависимость имеет линейный характер, что соответствует теории работы датчика Холла.

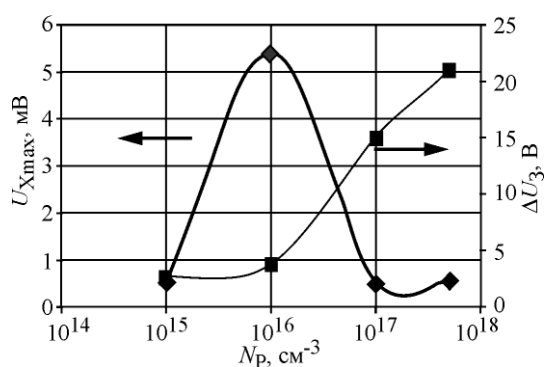


Рис.4. Зависимости ЭДС Холла и величины динамического диапазона ОПМЧ от концентрации примеси фосфора в рабочем слое датчика ($B = 60 \text{ мТл}$, $U_{\text{СИ}} = 2 \text{ В}$)

Fig.4. Dependence of the Hall voltage and the range of increased magnetic sensitivity versus the substrate concentration for SOI field-effect Hall sensor ($B = 60 \text{ мТл}$, $U_{DS} = 2 \text{ В}$)

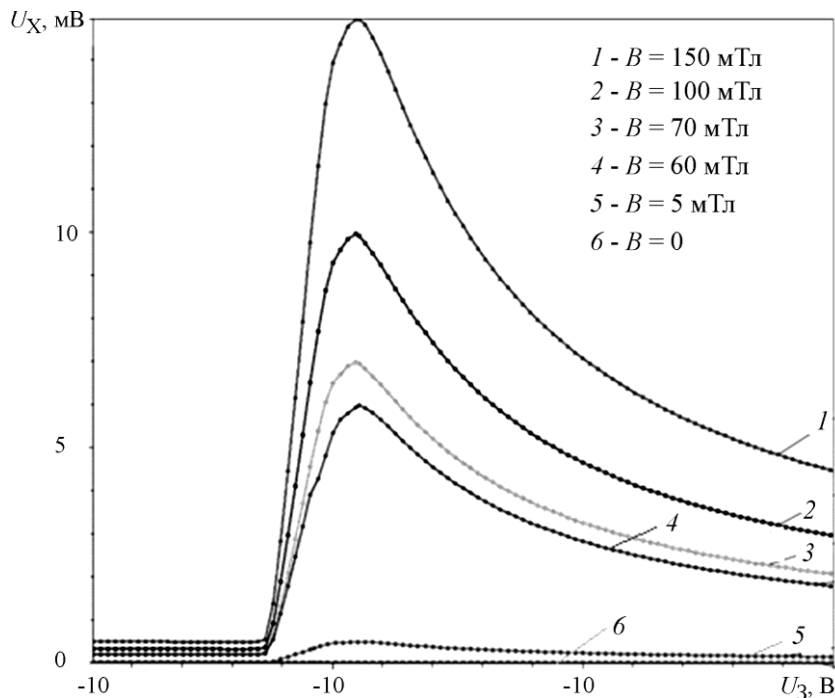


Рис.5. Зависимость ЭДС Холла от напряжения на затворе КНИ ПДХ при приложении разного магнитного поля ($N_p = 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $U_{\text{СИ}} = 2 \text{ В}$)

Fig.5. Dependence of the Hall voltage versus the gate-source voltage at different Magnetic Field values ($N_p = 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $U_{DS} = 2 \text{ В}$)

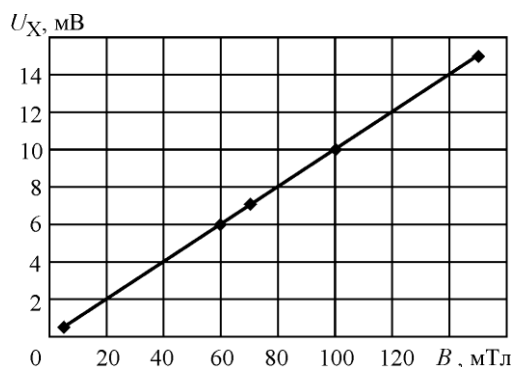


Рис. 6. Зависимость ЭДС Холла от магнитного поля ($N_p = 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $U_{\text{си}} = 2 \text{ В}$)

Fig. 6. Dependence of the Hall voltage versus the Magnetic Field value ($N_p = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $U_{DS} = 2 \text{ V}$)

При этом динамический диапазон ОПМЧ, который также зависит от концентрации примеси, достигает 5 В и более, что обеспечивает высокую помехоустойчивость функционирования датчика.

Полученные расчетные характеристики КНИ ПДХ совпадают с ранее опубликованными параметрами экспериментальных приборов.

Литература

1. Some features of magnetometric and sensor devices based on the field effect Hall sensor / **M.L. Baranochnikov, A.V. Leonov, V.N. Mordkovich et al.** // Advanced Electromagnetics Symposium. Proceedings. – Paris, France, 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 // Тр. МФТИ. – 2015. – Т.7. – №3. – С. 91–95.
4. **Бараночников М.Л.** Микромагнитоэлектроника. Т.1. – М.: ДМК Пресс, 2001. – 544 с.
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., 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.
7. **Королёв М.А., Павлюк М.И., Девликанова С.С.** Физическая модель полевого датчика Холла на основе КНИ структуры // Изв. вузов. Электроника. – 2017. – Т.22 – №2 – С. 166–170.
8. **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.

Поступила 10.04.2017 г.; принята к публикации 13.06.2017 г.

Королёв Михаил Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры интегральной электроники и микросистем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д.1).

Козлов Антон Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры интегральной электроники и микросистем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д.1).

Красюков Антон Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры интегральной электроники и микросистем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д.1).

Девликанова Светлана Сергеевна – аспирант кафедры интегральной электроники и микросистем Национального исследовательского университета «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 – novyy 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. Baranochnikov M.L. *Mikromagnitoelektronika*. T. 1 [Micromagneto-electronics. Vol. 1]. Moscow, DMK Press, 2001. 544 p.
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., Kozlov A.V., Krasnyukov A.Yu., Devlikanova S.S. Priborno-tehnologicheskoe modelirovanie VAH i zaryadovogo sostoyaniya KNI polevogo datchika Holla [Instrument-Process Simulation of Current-Voltage Characteristics and Charge State of SOI Field-Effect Hall Sensor]. *Izvestiya vuzov. Elektronika – Proceedings of Universities. Electronics*, 2017, vol. 22, no. 3, pp. 231–237. (In Russian).
7. 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).
8. Korolev M.A., Krupkina T.Yu., Chaplygin Yu.A. Priborno-tehnologicheskoe modelirovanie pri razrabotke izdelij mikroelektroniki i mikrosistemnoy 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).

Submitted 10.04.2017; accepted 13.06.2017.

Korolev Mikhail A. – Doctor of technical sciences, professor, deputy dean of the Integrated Electronics and Microsystems Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1)

Kozlov Anton V. – PhD of technical sciences, docent of the Integrated Electronics and Microsystems Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1)

Krasukov Anton Y. – PhD of technical sciences, docent of the Integrated Electronics and Microsystems Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1)

Devlikanova Svetlana S. – PhD student of the Integrated Electronics and Microsystems Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), petrunina.s@mail.ru