

УДК 621.3.087.92

*М. А. Королев, А. В. Козлов, С. С. Петрунина*

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

## Особенности функционирования полевого датчика Холла на основе КНИ структур, предназначенного для работы в телекоммуникационных сетях

Проведено исследование работы полевого датчика Холла на основе КНИ структуры в режиме обеднения для применения в телекоммуникационных сетях. Показано и объяснено, что в режиме обеднения у датчика наблюдается аномально высокая чувствительность, что является несомненным преимуществом с точки зрения исследования земного магнетизма. Построена зависимость тока стока от напряжения затвор-исток КНИ структуры.

**Ключевые слова:** КНИ полевой датчик Холла, режим обеднения, концентрация примеси, ток стока.

*M. A. Korolev, A. V. Kozlov, S. S. Petrunina*

National Research University of Electronic Technology

## Functioning features of the SOI field-effect hall sensor designed for application in telecommunications networks

In this paper, we study the operation of the Hall sensor SOI structure in the depletion mode for applying in telecommunications networks. It is shown and explained that there is an abnormally high sensitivity in the depletion mode of the sensor which is an advantage in terms of the study of terrestrial magnetism. The dependence of the drain current on the gate-source voltage of the SOI structure is presented.

**Key words:** SOI field-effect Hall sensor, depletion mode, doping concentration, drain current.

В настоящее время одним из важнейших направлений современных средств измерений и наблюдений за Землей и ее изменениями являются искусственные спутники Земли (ИСЗ). С помощью ИСЗ ученые получают информацию о магнитном поле земли, океанов, а также в военных целях. Данные снимаются и передаются с помощью телекоммуникационной сети, важнейшим элементом которой является датчик магнитного поля (ДМП). С точки зрения исследования земного магнетизма важнейшим параметром датчика является его магниточувствительность.

Существуют различные методы измерения магнитного поля, но известно, что наиболее распространенный тип ДМП – датчики Холла.

Последнее время появились работы о полевых датчиках Холла на основе КНИ структуры (КНИ ПДХ), которые обладают рядом преимуществ, описанных в статьях [1], [2]. Приведем лишь структуру устройства для наглядности. ПДХ изготавливался по технологии «кремний на изоляторе». Топология датчика схематически изображена на рис. 1. Поперечное сечение КНИ ПДХ представлено на рис. 2.

Для исследования структуры КНИ ПДХ и оптимизации параметров наиболее целесообразно использовать методы математического моделирования. В нашей работе [3] была проведена разработка математической модели и получено семейство выходных и передаточных характеристик ПДХ в зависимости от концентрации примеси в рабочем слое прибора, зависимость тока стока от уровня легирования рабочего слоя при нулевом потенциале на затворе и семейство передаточных характеристик при разных концентрациях примеси в

объемной подложке. Результаты сравнения экспериментальной и расчетной характеристик приведены на рис. 3.

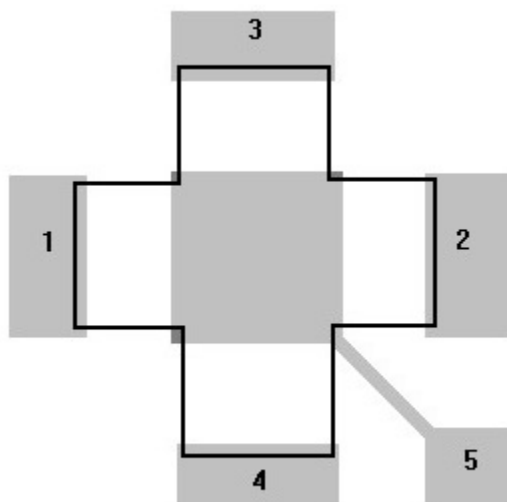


Рис. 1. Топология элемента ПЭХ: 1, 2 – токовые электроды; 3, 4 – электроды для измерения ЭДС Холла; 5 – электрод верхнего затвора

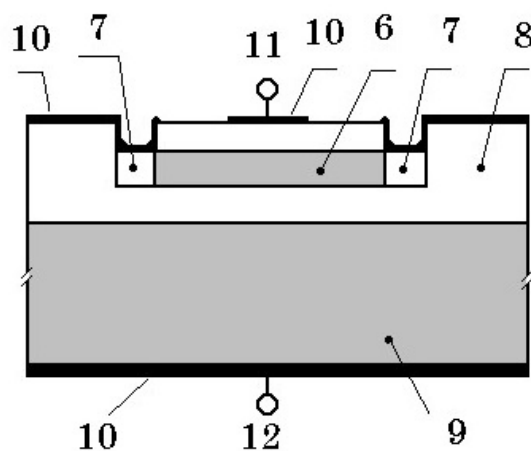


Рис. 2. Поперечное сечение ПЭХ: 6 –  $n$ -Si рабочий слой (тело); 7 – омические контакты ( $n \pm Si$ ); 8 –  $SiO_2$ ; 9 – подложка ( $n-Si$ ); 10 – Al пленка; 11 – верхний затвор; 12 – нижний затвор

Как следует из рис. 3, расчетные и экспериментальные кривые имеют хорошее совпадение, что свидетельствует об адекватности разработанной математической модели реальному образцу прибора. С помощью разработанной модели были построены графики, определяющие зависимости основных параметров прибора от концентрации примеси в подложке и теле датчика.

Следует отметить, что авторы работы [1] обнаружили эффект аномальной подпороговой чувствительности (рис. 4), но в статье не приводится описание физического механизма этого эффекта.

На наш взгляд, данная аномалия вызвана тем, что этот участок связан с работой прибора в области обеднения. В данном случае тело представляет собой слой кремния, который

изолирован от двух границ областью пространственного заряда (ОПЗ) (рис. 5) толщиной  $X_{d1}$  и  $X_{d2}$ , что обеспечивает минимизацию захвата носителей заряда и, соответственно, их высокую подвижность.

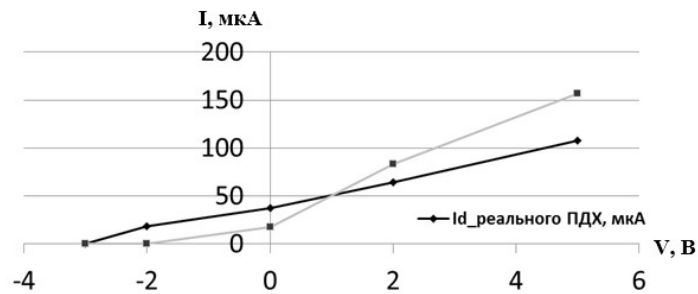


Рис. 3. Зависимость тока стока от напряжения на верхнем затворе при  $U_{си} = 2\text{В}$ ,  $U_{зи} = 0$

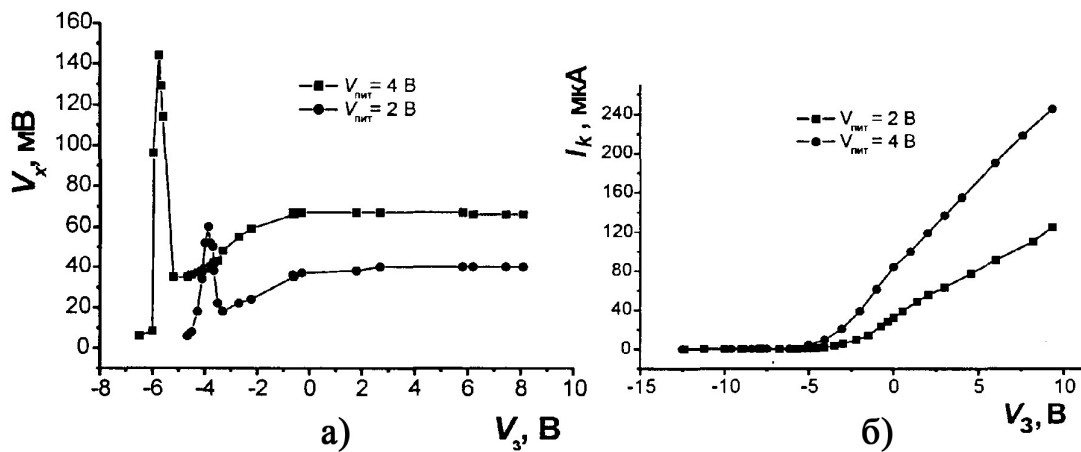


Рис. 4. Холловские (а) и сток-затворные (б) характеристики КНИ ПДХ при различных значениях напряжения питания

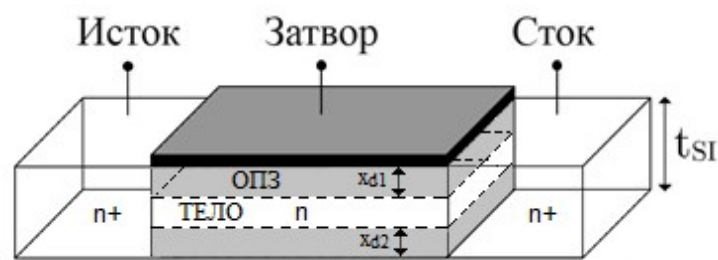


Рис. 5. Структура полевого ДХ в режиме обеднения

Модуль напряжения Холла определяется следующим образом:

$$|V_H| = \frac{r_n}{ent} GBI, \tag{1}$$

где  $e$  и  $n$  – заряд и концентрация носителей заряда,  $r_n$  – коэффициент пропорциональности (холл-фактор), зависящий от механизма рассеяния,  $G$  – поправочный коэффициент на геометрию прибора,  $B$  – величина магнитной индукции,  $I$  – ток стока.

При преобразовании выражения (1), как видно из формулы (2), напряжение Холла прямо пропорционально подвижности, толщине элемента и напряжению питания:

$$V_H = \mu_n \frac{w}{l} GBI, \tag{2}$$

где  $\mu_n$  – подвижность носителей,  $w$  и  $l$  – толщина и длина образца соответственно,  $V$  – напряжение питания.

Абсолютная чувствительность элемента Холла определяется выражением

$$S_F = \left| \frac{\partial V_H}{\partial B} \right|_{I=\text{const}}. \tag{3}$$

Из формул (1), (2), (3) можно определить относительную чувствительность по току питания как

$$S_{RI} = \left| \frac{1}{I} \frac{\partial V_H}{\partial B} \right| = \frac{r_n}{ent} \left[ \frac{B}{AT} = \frac{\text{Вольт}}{\text{Ампер} \cdot \text{Тесла}} \right] \tag{4}$$

и относительную чувствительность по напряжению как

$$S_{RV} = \left| \frac{1}{V} \frac{\partial V_H}{\partial B} \right| = \mu_n \frac{w}{l} GT^{-1}. \tag{5}$$

Как следует из приведенных формул, чувствительность ДМП пропорциональна подвижности носителей заряда и обратно пропорциональна толщине рабочего слоя и концентрации носителей.

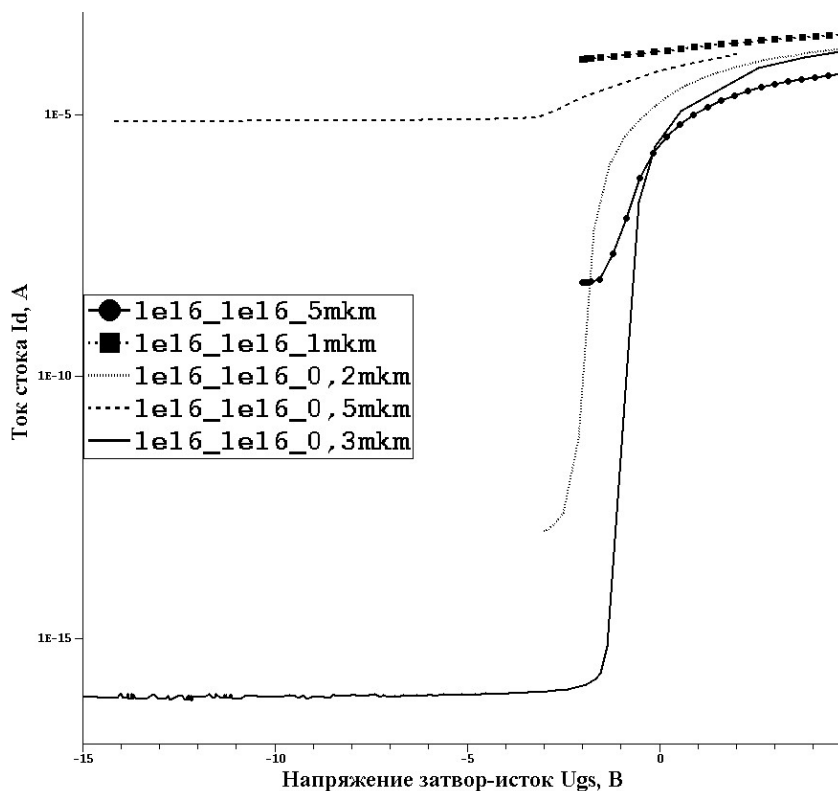


Рис. 6. Семейство передаточных ВАХ КНИ ПЭХ при толщинах тела: 0,2 мкм, 0,3 мкм, 0,5 мкм, 1 мкм, 5 мкм

При больших отрицательных напряжениях происходит перекрытие тела датчика ОПЗ, но по мере уменьшения приложенного отрицательного напряжения протяженность ОПЗ уменьшается, исчезает их перекрытие и формируется проводящий канал.

В итоге в этот момент имеется:

- 1) высокая подвижность;

2) малая эффективная толщина рабочего слоя;

3) низкая концентрация носителей заряда

– и в соответствии с формулами (4), (5) это как раз и характеризует высокую магнитную чувствительность.

Однако при переходе через напряжение затвор–исток  $U_{зи} = 0$  происходит обогащение поверхности кремния электронами. В результате и ток, и магнитная чувствительность определяются тонким слоем электронов на поверхности кремния на границе раздела с окислом кремния. Вследствие образования этого слоя возникает ОПЗ, приводящее к исчезновению проводящей прослойки внутри пленки. В итоге магнитная чувствительность уменьшается

1) из-за резкого падения подвижности, вследствие захвата ловушками электронов на границе раздела кремний–окисел;

2) из-за высокой концентрации носителей в обогащенном слое.

Используя математическую модель полевого КНИ ДХ и методику математического моделирования, изложенные в нашей работе [3], было определено влияние толщины рабочего слоя прибора на сток стока (рис. 6). Как следует из представленных графиков, толщина тела определяет напряжение отсечки внутреннего канала и, соответственно, влияет на динамический диапазон функционирования датчика, работающего в режиме обеднения.

Таким образом, предоставляет несомненный научный и практический интерес исследование КНИ ПДХ именно в области обеднения, когда наблюдается аномально высокое напряжение Холла, определяющее пороговую чувствительность датчика, что особенно важно при использовании этого прибора в телекоммуникационных космических системах.

## Литература

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, France, 2012. P. 455–459.
2. 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.
3. Козлов А.В., Королёв М.А., Петрунина С.С. Математическое моделирование влияния концентрации примеси на ток стока КНИ полевого датчика Холла // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2015. № 4.

## 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, France, 2012. P. 455–459.
2. Mordkovich V.N., Baranochnikov M.L., Leonov A.V., Mokrushin A.D., Omelyanovskii N.M., Pazhin D.M. Field Hall Sensor is a new type of transmitter magnetic field. Sensors and Systems. 2003. V. 7. P. 33–38.
3. Kozlov A.V., Korolev M.A., Petrunina S.S. Mathematician Simulation of Doping Concentration Influence on Drain Current Value of SOI Field-Effect hall Sensor. Proceedings of Universities. Electronics. 2015. № 4. P. 377–381.

Поступила в редакцию 03.07.2015.