

Математическое моделирование влияния концентрации примеси на величину тока стока КНИ полевого датчика Холла

А.В. Козлов, М.А. Королёв, С.С. Петрунина

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

Mathematical Simulation of Doping Concentration Influence on Drain Current Value of SOI Field-Effect Hall Sensor

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

National Research University of Electronic Technology, Moscow

Проведено исследование влияния концентрации примеси в рабочем слое и объеме подложки на ток стока КНИ полевого датчика Холла средствами приборно-технологического моделирования в пакете Synopsys Sentaurus. Выполнена настройка численной модели путем сопоставления передаточных ВАХ: расчетной и ранее экспериментально созданного и измеренного образца КНИ полевого датчика Холла. Показано, что при низких концентрациях в рабочем слое ток стока сильно зависит от потенциала верхнего затвора, а уровень легирования в объеме подложки влияет на ток стока лишь при работе прибора в режиме обеднения.

Ключевые слова: КНИ полевой датчик Холла; Synopsys Sentaurus; концентрация примеси; ток стока.

The influence of the doping concentration in the active layer and in the bulk substrate on the drain current of the SOI field by the Hall sensor device-technological simulation package Synopsys Sentarius has been studied. At the initial stage the numerical model correction has been performed by comparing the transmission current-voltage characteristics of the calculation and the previously created and experimentally measured sample SOI FEHS. It has been shown that at low concentrations in the active layer the drain current depends on the capacity of the front gate and the doping concentration level of the bulk substrate affects the drain current only when the device is operating in depletion mode.

Keywords: the SOI field by the Hall sensor, device-technological simulation package Synopsys Sentaurus, the doping concentration, the drain current.

Введение. Полевой датчик Холла (ПДХ) на основе КНИ-структуры превосходит классический датчик Холла по следующим критериям [1, 2]: может использоваться как высокотемпературный (до 300 °С) преобразователь магнитного поля; имеет высокую устойчивость к воздействию радиации за счет использования КНИ-технологии; пороговая магнитная чувствительность может резко возрасти (в десятки раз), соответственно, и расширяется динамический диапазон магнитной чувствительности; работает при

низком значении рабочего тока КНИ ПДХ (при полностью открытом канале порядка $-0,1-0,4$ мА); может управляться постоянным током; отсутствуют «ключи» и, соответственно, коммутационные помехи; возможна реализация максимальной пороговой чувствительности путем повышения отношения сигнал/шум.

Полевые датчики Холла изготовлены и исследованы. Однако дальнейшая оптимизация их параметров невозможна без использования численного моделирования с применением современных пакетов приборно-технологического моделирования.

В настоящей работе в качестве инструмента исследования использовалась система Sentaurus TCAD [3] компании Synopsys. Представленный в работе [1] ПДХ изготавливался по КНИ-технологии. Топология и поперечное сечение КНИ ПДХ схематически изображены на рис.1.

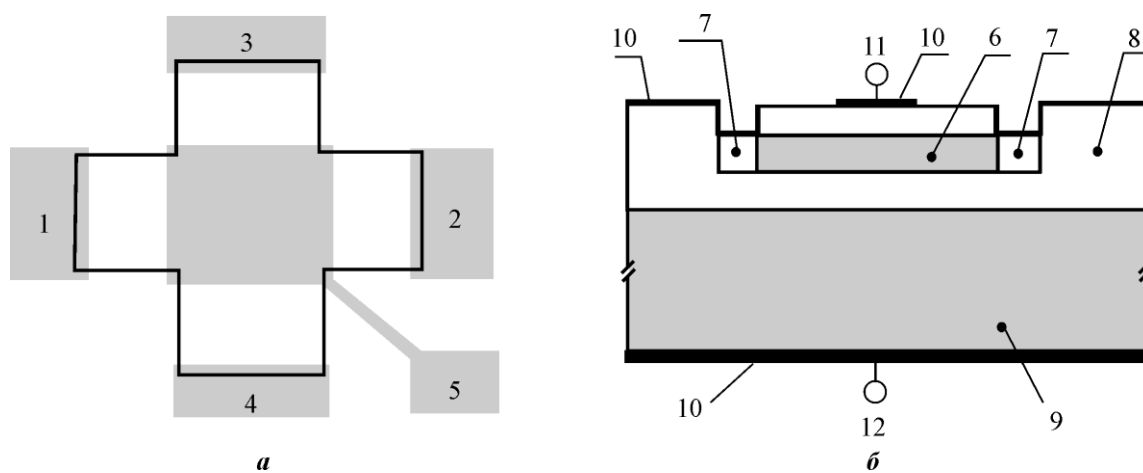


Рис.1. Схематическое изображение КНИ ПДХ: а – топология (1, 2 – токовые электроды; 3, 4 – электроды для измерения ЭДС Холла; 5 – электрод верхнего затвора); б – поперечное сечение (6 – рабочий слой (n-Si); 7 – омические контакты (n⁺-Si); 8 – SiO₂; 9 – подложка (n-Si); 10 – алюминиевая пленка; 11 – верхний затвор; 12 – нижний затвор)

Математическая модель. Эмпирически установлено, что один из важнейших параметров ПДХ – поле Холла E_H – определяется плотностью тока J , индукцией магнитного поля B и величиной R , характеризующей свойства образца [4]:

$$E_H = R[BJ] = R\sigma[BE] = -R\sigma[EB].$$

Плотность тока J пропорциональна току, протекающему через рабочий слой датчика, т.е. току стока КНИ ПДХ. Поэтому научный и практический интерес представляет определение влияния на этот параметр концентрации примеси в рабочем слое датчика и в подложке.

ПДХ имеет крестовидную топологию (рис.1,а). Поэтому расчет электрических ВАХ, связанных с распределением носителей заряда при отсутствии или под воздействием магнитного поля, в том числе возникновение холловской ЭДС в магнитном поле, возможен только при использовании математического моделирования трехмерной структуры. Однако для решения поставленных задач можно использовать результаты двумерного моделирования.

Для численного расчета в Synopsys Sentaurus TCAD на начальном этапе проводилась настройка математической модели путем сопоставления передаточной характеристики [1] и рассчитанного с помощью TCAD КНИ ПДХ. Разработана двумерная математическая модель в соответствии с сечением ПДХ (рис.1,б). В качестве подложки выбран кремний,

легированный донорной примесью с постоянной концентрацией $N_p = 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Толщина подложки 250 мкм (слой 9). На нижней поверхности подложки сформирован управляющий алюминиевый электрод (слой 12), на верхнюю поверхность подложки нанесен изолирующий слой SiO_2 (слой 8) толщиной 0,4 мкм. На изолирующий оксид кремния нанесен рабочий слой $n\text{-Si}$ длиной 80 мкм, шириной 30 мкм и толщиной 0,2 мкм с постоянной концентрацией примеси фосфора $N_p = 10^{16} \text{ см}^{-3}$. По краям слоя $n\text{-Si}$ сформированы омические контакты $n^+\text{-Si}$ (слой 7) длиной 10 мкм со спадающей концентрацией донорной примеси от 10^{20} до 10^{16} см^{-3} . На рабочий слой $n\text{-Si}$ нанесен подзатворный диэлектрик SiO_2 толщиной 0,1 мкм, на котором сформирован алюминиевый электрод затвора (слой 11).

Структура прибора задавалась аналитически в программе MDRAW, где создавались 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 прибора в программе DESSIS 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 (верхним электродом затвора) и уровнем Ферми кремния (рабочим слоем) через тонкий подзатворный диэлектрик. С помощью итерационного метода проводилось изменение функции по изменению аргумента. Построение передаточных и выходных ВАХ осуществлялось в программе INSPECT.

Сравнение экспериментальной и расчетной передаточных характеристик представлено на рис.2. Как следует из графика, расчетные и экспериментальные кривые имеют хорошее совпадение, что свидетельствует об адекватности разработанной математической модели реальному образцу прибора.

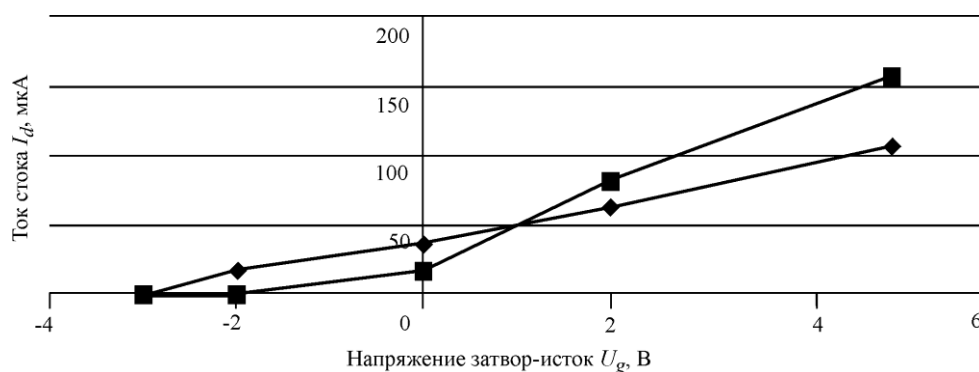


Рис.2. Зависимость тока стока от напряжения на верхнем затворе при $U_d = 2\text{В}$, $U_g = 0$: —■— расчет; —◆— эксперимент

Расчет выходной и передаточной ВАХ прибора. Расчет выходной ВАХ ПДХ проводился при отсутствии внешнего магнитного поля на основе решения уравнений непрерывности для электронов и дырок, а также уравнения Пуассона диффузионно-дрейфовой модели.

В качестве начального условия на все четыре электрода (сток, исток, верхний и нижний затворы) подавались нулевые потенциалы. Выбрана схема включения транзистора с общим электродом истока, т.е. потенциал электрода стока возрастал до напря-

жения $U_{\text{пит}} = 5$ В. Семейство рассчитанных выходных характеристик при увеличении концентрации донорной примеси в подложке и, соответственно, рабочем n -слое в диапазоне 10^{14} – 10^{18} см^{-3} приведено на рис.3. Видно, что по мере увеличения концентрации легирующей примеси не только возрастает ток стока, но также в пологой области увеличивается крутизна выходной характеристики.

Расчет передаточной ВАХ ПДХ проводился при отсутствии внешнего магнитного поля на основе решения уравнений непрерывности для электронов и дырок, а также уравнения Пуассона диффузионно-дрейфовой модели. В качестве начального условия на два электрода (исток, нижний затвор) подавались нулевые потенциалы, сток имел потенциал 2 В, на верхнем затворе потенциал изменялся от -3 до $+5$ В. На рис.4 представлено семейство передаточных характеристик. Как следует из данного рисунка, при концентрации примеси в теле прибора $N_p = 10^{17}$ см^{-3} и выше КНИ ПДХ ток стока имеет максимальную величину, но перестает управляться затвором.

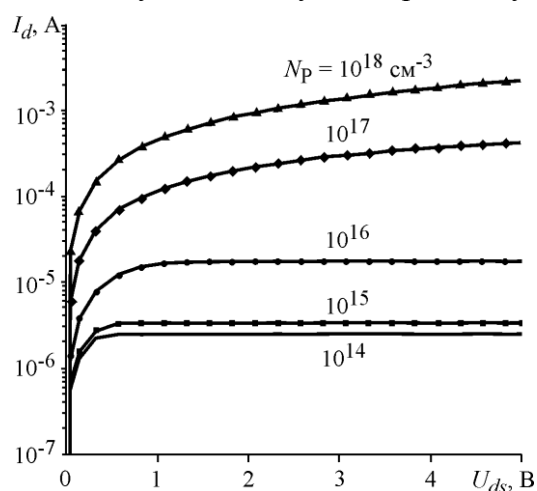


Рис.3. Семейство рассчитанных выходных ВАХ ПДХ при разных концентрациях примеси в рабочем слое прибора ($U_g = 0$; $U_{\text{sub}} = 0$)

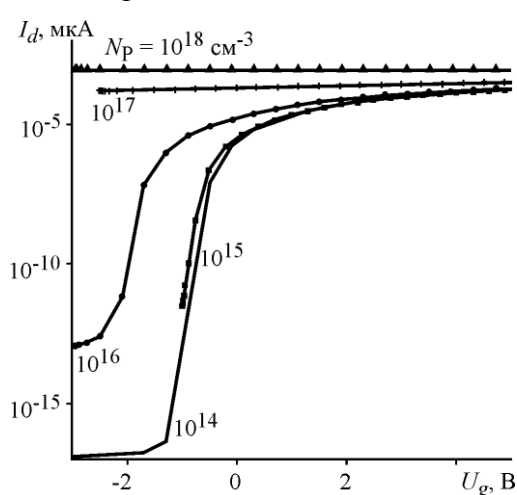


Рис.4. Семейство передаточных ВАХ ПДХ в зависимости от концентрации примеси в рабочем слое прибора

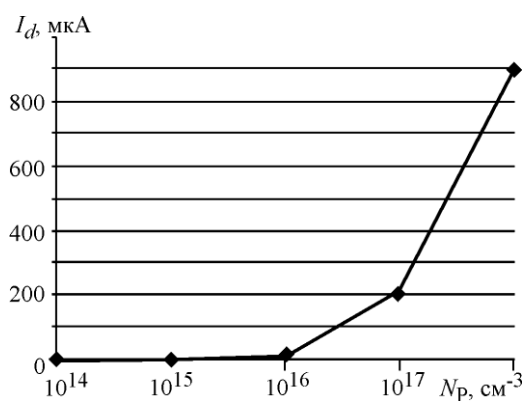


Рис.5. Зависимость тока стока от уровня легирования рабочего слоя при нулевом потенциале на затворе

Исследование зависимости тока стока от концентрации примеси в рабочем слое n -Si и в подложке. Проведено исследование зависимости тока стока от концентрации легирующей примеси в рабочем слое n -Si. В частности, концентрация фосфора N_p увеличивалась от 10^{14} до 10^{18} см^{-3} с шагом один порядок величины. Результаты влияния концентрации донорной примеси в рабочем слое на ток стока при $U_g = 0$, $U_{\text{sub}} = 0$, $U_d = 2$ В представлены на рис.5.

Проведено исследование влияние концентрации примеси в объемном слое подложки на величину тока стока. Концентрация фосфора в рабочем слое составляла $N_p = 10^{14}$ см^{-3} . Потенциал нижнего затвора

равен нулю, потенциал стока 2 В, напряжение на верхнем затворе изменялось от –3 до +5 В. Результаты представлены на рис.6.

Заключение. Впервые разработана математическая модель КНИ ПДХ. Проведено сравнение экспериментальной и расчетной передаточных характеристик прибора и получено хорошее совпадение результатов, что говорит об адекватности разработанной математической модели реальному образцу прибора.

Результаты исследования влияния концентрации примеси в рабочем слое датчика на ток стока показали, что по мере увеличения концентрации примеси ток стока растет, а его зависимость от напряжения на верхнем затворе ослабевает. В режиме обогащения (на затворе положительный потенциал) концентрация примеси в подложке практически не оказывает влияния на ток стока прибора. Однако при переходе в режим обеднения (на затворе отрицательный потенциал) влияние концентрации примеси на ток стока проявляется вследствие изменения контактной разности потенциалов на нижнем затворе.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (проект № 2720, задание № 2014/101).

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, 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. Synopsys Sentaurus TCAD manual. Version X-2005.10
4. **Кобус А., Тушинский Я.** Датчики Холла и магниторезисторы: пер. с польск. / Под. ред. О.К. Хомерики. – М.: Энергия, 1971. – 351 с.

Статья поступила
13 апреля 2015 г.

Королёв Михаил Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры интегральной электроники и микросистем, заместитель декана факультета электроники и компьютерных технологий МИЭТ. *Область научных интересов:* физика и технология изделий микроэлектроники.

Козлов Антон Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры интегральной электроники и микросистем МИЭТ. *Область научных интересов:* приборно-технологическое моделирование магниточувствительных элементов датчиков магнитного поля. **E-mail: anton@dsd.miee.ru**

Петрунина Светлана Сергеевна – магистрант кафедры интегральной электроники и микросистем МИЭТ.

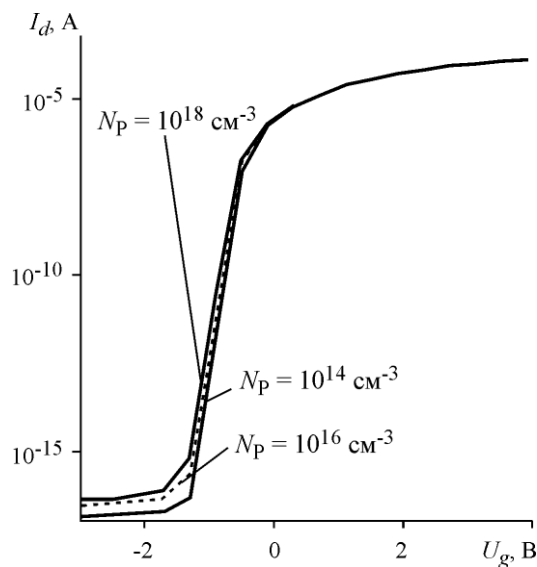


Рис.6. Семейство передаточных ВАХ ПДХ при разных концентрациях примеси в объеме подложки