

Численное моделирование характеристик элемента Холла на основе МДП-транзистора со встроенным каналом

Р.З. Хафизов¹, М.И. Павлюк², А.Е. Тимофеев³

¹ООО «ГрафИмпресс», Москва, imagelab@mail.ru

²АО «ПКК Миландр», Москва

³ АО «ЗНТЦ», Москва

Аннотация — Методами приборно-технологического моделирования исследованы электрофизические параметры и характеристики магнитной чувствительности кремниевых полевых элементов Холла на основе МДП-структур со встроенным каналом в широком диапазоне управляющих потенциалов. Для модельной осесимметричной структуры, соответствующей КМОП технологии уровня 0,35 мкм, выявлена динамика пространственного распределения концентрации свободных носителей заряда и плотности тока в приповерхностном слое полупроводника, определяющая зависимость ЭДС Холла от степени взаимодействия носителей заряда с границей раздела полупроводник-диэлектрик. Показано, что за счет управления электростатическим состоянием канала проводимости МДП-элементов Холла можно в широких пределах регулировать чувствительность полевых магнитных датчиков (ПДХ), обеспечивая условия для реализации дополнительных интеллектуальных функций сенсорных магниточувствительных приборов.

Ключевые слова — элемент Холла (ЭХ), ЭДС Холла, магнитная индукция, область пространственного заряда (ОПЗ), структура металл-диэлектрик-полупроводник (МДП), полевой датчик Холла (ПДХ), КМОП технология, структура кремний на изоляторе (КНИ), интегральная схема (ИС).

I. ВВЕДЕНИЕ

В современной микроэлектронике, начиная с 60-х годов прошлого века и по сей день, подавляющее большинство приборов изготавливаются на основе кремния. Это относится и к магниточувствительным датчикам и к интегральным схемам на их основе. Существенное преимущество кремниевых датчиков Холла заключается в использовании для их изготовления базовой технологии кремниевой микроэлектроники, что обеспечивает совместимость сенсорных элементов с интерфейсной электроникой, расширяя диапазон их рабочих характеристик и возможностей применения за счет обработки сигналов. Кроме этого, использование современной КМОП технологии дает возможности реализации полевых датчиков Холла (ПДХ) на базе структур металл-диэлектрик-полупроводник (МДП), как с

инверсионным поверхностным каналом, так и включающих встроенный объемный канал проводимости, а также возможность полной диэлектрической изоляции сенсора от несущей подложки и прилегающих схемных элементов за счет формирования чувствительных элементов на структурах кремний на изоляторе (КНИ) [1,2].

Полевые МДП датчики Холла относятся к классу полупроводниковых приборов, на функционирование которых существенное влияние оказывают поверхностные эффекты [3,4]. В кремниевых элементах Холла на основе МДП транзисторов с инверсионным каналом степень влияния этих эффектов на величину ЭДС Холла и, соответственно, на чувствительность ПДХ определяется зависимостью подвижности носителей заряда от их рассеяния на границе раздела Si-SiO₂ [5]. При разработке таких приборов данная проблема решается несколькими путями. Один из них — это отработка технологических процессов получения границы раздела Si-SiO₂, содержащей минимальное количество рассеивающих центров [6]. Другой путь состоит в выборе структур с электронным типом проводимости, обеспечивающим максимально возможное значение подвижности носителей заряда, а также формирование встроенного (скрытого) канала с потенциальным рельефом вблизи границы раздела Si-SiO₂, препятствующим контакту носителей с поверхностью [7].

В данной работе методами приборно-технологического моделирования исследованы характеристики магнитной чувствительности кремниевых полевых элементов Холла на основе МДП-транзисторных структур со встроенным каналом. Исследования проводились на модельных образцах с осесимметричной топологической конструкцией, разработанной с использованием проектных норм 0,35 мкм. Моделировались электрические режимы питания образцов, обеспечивающие как инверсию, так и обогащение границы раздела полупроводник-диэлектрик. Цель работы состояла в выявлении диапазонов полевого управления функциональными характеристиками полевых МДП элементов Холла.

II. ПРОЦЕСС МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЛЕВОГО ЭЛЕМЕНТА ХОЛЛА НА ОСНОВЕ МДП-ТРАНЗИСТОРА СО ВСТРОЕННЫМ КАНАЛОМ

Для исследования характеристик элемента Холла со встроенным каналом и МДП полевым управлением в широком диапазоне управляющих напряжений (как положительных, так и отрицательных) моделировался тестовый сенсор с топологической конструкцией и структурой, сформированными с учетом проектных норм и электрофизических параметров слоев в соответствии с правилами проектирования и приборно-технологической спецификацией XH035 фабрики XFAB (рисунок 1). Сенсор в виде холловского МДП-транзистора сформирован на кремниевой подложке р-типа проводимости с удельным сопротивлением 15 Ом/см. Встроенный канал транзистора на границе раздела Si-SiO₂ представляет собой N-карман (NWELL) глубиной 3,5 мкм. Для реализации возможности изменения электростатического состояния N-кармана в широком диапазоне его поверхностное сопротивление выбрано равным 30 кОм/кв. Электростатическое управление проводимостью канала осуществляется полевым электродом (Poly1) через тонкий окисел толщиной 45 нм. Для моделирования выбрана прямоугольная конфигурация элемента (200x200 мкм) с точечными осесимметричными контактами (p+ области, с размерами 5x5 мкм, глубиной 0,6 мкм и поверхностным сопротивлением 57 Ом/кв).

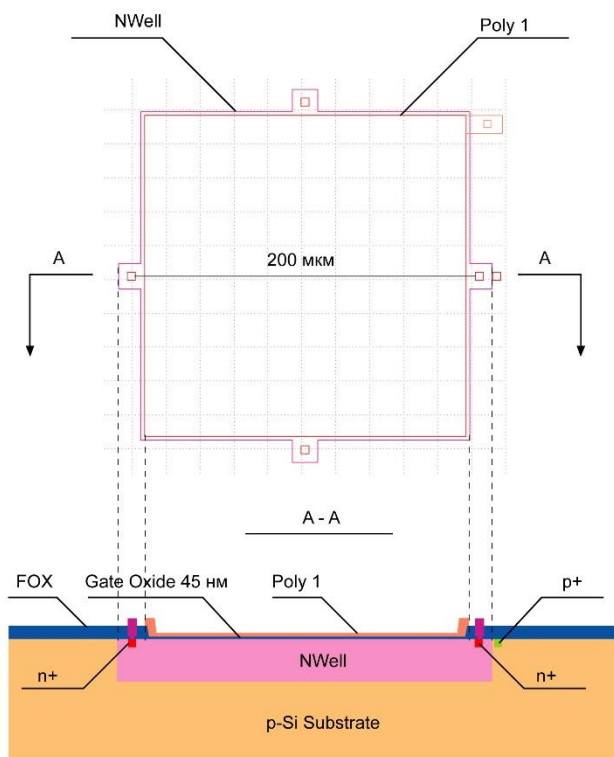


Рис. 1. Топология и структура МДП элемента Холла со встроенным каналом

Моделирование проводилось с использованием программного комплекса Synopsys Sentaurus TCAD методом конечных элементов (КЭ). На основе

технологических параметров слоев и разработанной топологии обеспечивалось построение трехмерной модели элемента Холла, выполнялась генерация и настройка параметров сетки для оптимизации времени и точности расчёта, а также обработка результатов для построения типовых зависимостей датчика. Процессы переноса носителей заряда моделировались в рамках диффузионно-дрейфовой модели, включающей в себя уравнения непрерывности для электронов и дырок и уравнение Пуассона. Учитывалась рекомбинация носителей заряда в соответствии с механизмом Шокли-Рида-Холла, а именно, зависимость времени жизни носителей от концентрации примеси, возникающей в результате строгой корреляции концентрации центров рекомбинации с уровнем легирования полупроводника, а также Оже-рекомбинация. Используемая модель принимала во внимание полевую зависимость подвижности электронов и дырок и изменение подвижности и ширины запрещённой зоны с изменением концентрации легирующей примеси.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рисунке 2 представлены выходная (а) и сток-затворная (б) характеристики элемента.

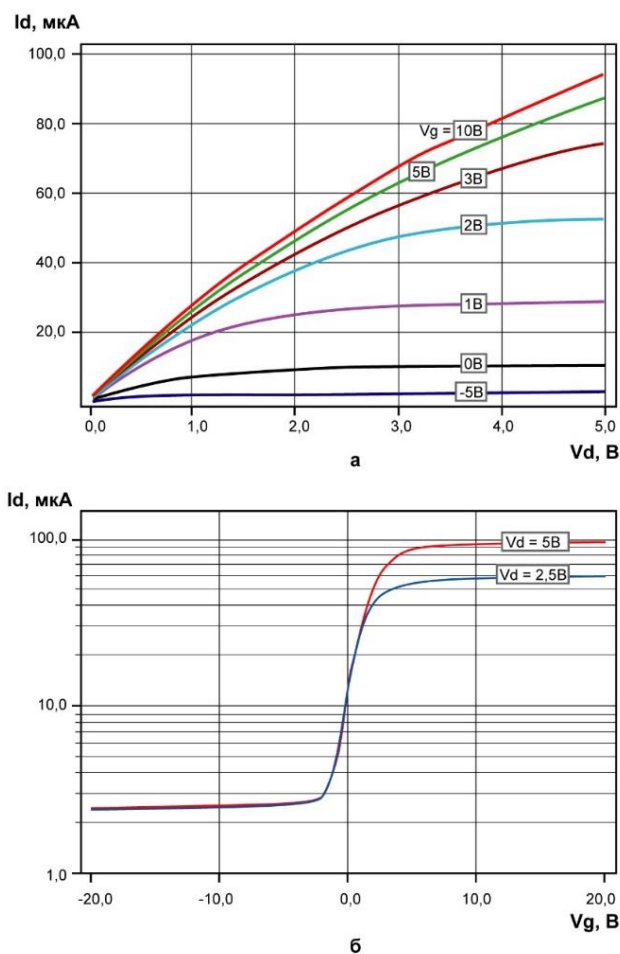


Рис. 2. Выходная (а) и сток-затворная (б) характеристики МДП элемента Холла со встроенным каналом

При изменении потенциала V_g полевого электрода от положительных до отрицательных значений граница раздела диэлектрик-полупроводник переходит от состояния сильного обогащения электронами до инверсии проводимости, проходя при $V_g \sim 0$ состояние плоских зон. На рисунке 3 этот переход иллюстрируется зависимостью распределения концентрации свободных носителей заряда (электронов и дырок) по глубине N-кармана.

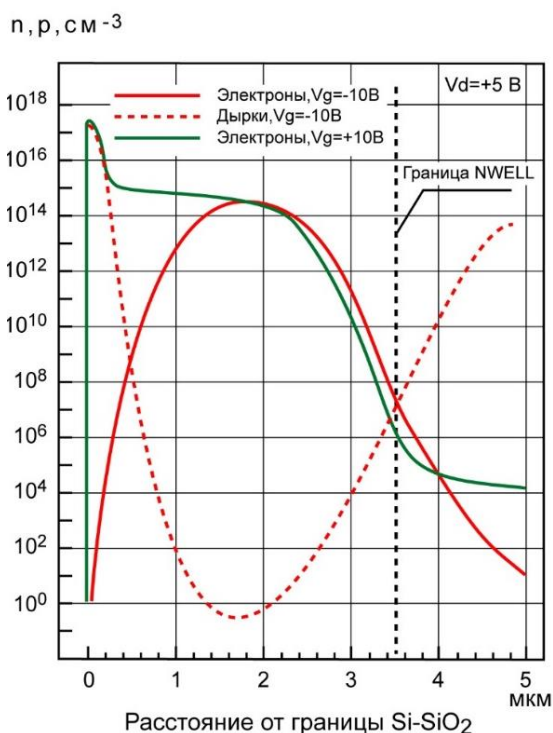


Рис. 3. Распределение концентрации электронов и дырок по глубине N-кармана

Из рисунка видно, что концентрация свободных носителей заряда на границе раздела диэлектрик-полупроводник, как электронов при сильном обогащении ($V_g = +10\text{В}$), так и дырок при сильной инверсии ($V_g = -10\text{В}$), достигает значений $n, p \sim 5 \cdot 10^{17} \text{см}^{-3}$. Ясно, что такое кардинальное изменение условий электронной проводимости канала, когда при сильном обогащении она обусловлена проводимостью тонкого (менее 1 мкм) приповерхностного слоя полупроводника с высокой концентрацией электронов, а при сильной инверсии – заглубленным проводящим слоем с концентрацией электронов, соответствующей уровню легирования N-кармана ($N_D \sim 10^{15} \text{см}^{-3}$), будет оказывать существенное влияние на магнитные характеристики элемента.

Смещение канала проводимости от поверхности вглубь N-кармана при переходе поверхности от состояния обогащения к инверсии иллюстрируется рисунком 4, на котором представлена 2d иллюстрация зависимости плотности тока между истоком и стоком транзистора от расстояния от границы раздела диэлектрик-полупроводник.

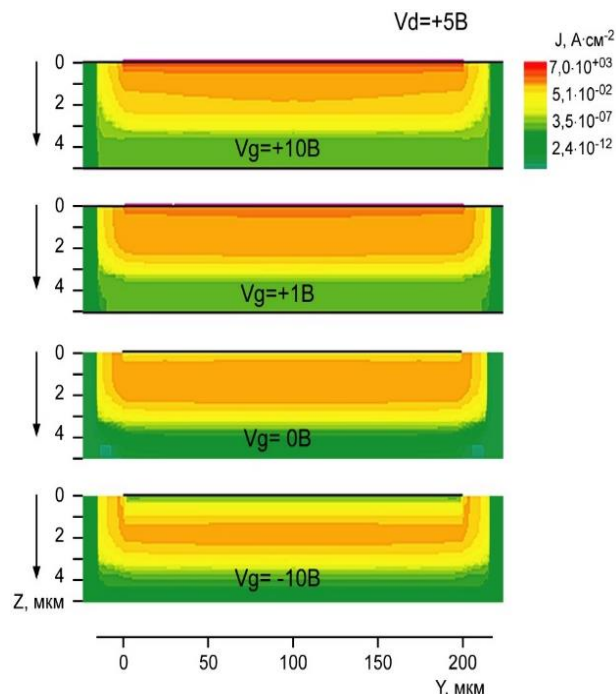


Рис. 4. Распределение плотности тока между истоком и стоком транзистора при различных значениях потенциала полевого электрода

Характеристики магнитной чувствительности моделируемого датчика в зависимости от потенциала полевого электрода при двух значениях напряжения между истоком и стоком транзистора представлены на рисунке 5.

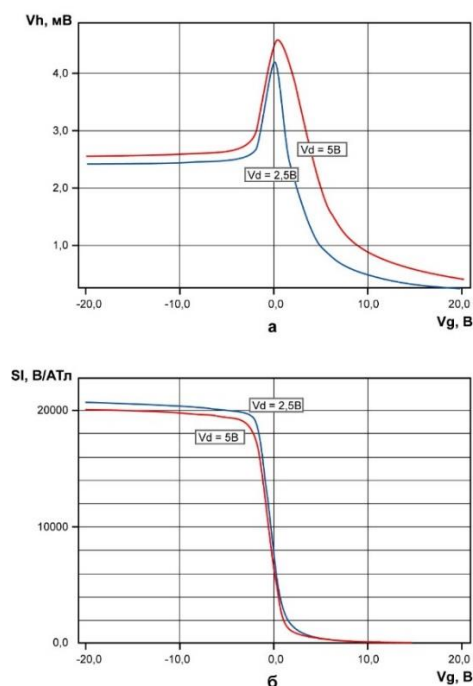


Рис. 5. Характеристики магниточувствительности элемента: зависимости ЭДС Холла (а) и токовой магниточувствительности (б) от потенциала полевого электрода при $V_d = 5$ и $2,5\text{В}$ ($B = 50 \text{ мТл}$)

Зависимость ЭДС Холла при постоянном напряжении питания и вариациях потенциала полевого затвора определяется следующими физическими процессами.

При отрицательных значениях потенциала полевого электрода граница раздела диэлектрик-полупроводник находится в состоянии инверсии с высокой концентрацией дырок на поверхности полупроводника, большая часть управляющего потенциала падает на диэлектрике, при этом ток канала определяется проводимостью объема N-кармана, отсеченного областями пространственного заряда (ОПЗ) на поверхности и на границе раздела кармана с р-подложкой, и практически не меняется вплоть до значений V_g , близких к потенциалу плоских зон. При переходе от отрицательных к положительным значениям потенциала полевого электрода поверхность полупроводника проходит состояние плоских зон, при котором канал проводимости имеет максимальную глубину, еще не выходя при этом на поверхность, что обеспечивает поддержание подвижности электронов, соответствующей ее объемному значению. В этом состоянии полевые и концентрационные эффекты, влияющие на снижение подвижности минимальны и ЭДС Холла имеет максимальное значение.

При увеличении положительных значений потенциала полевого электрода поверхность полупроводника переходит в состояние сильной аккумуляции, при котором протекание тока через канал происходит по тонкому приповерхностному слою, при этом подвижность электронов за счет влияния высокой концентрации свободных носителей и рассеяния на границе раздела диэлектрик-полупроводник существенным образом уменьшается [3]. Соответственно, происходит падение ЭДС Холла. Уменьшение подвижности электронов в зависимости от их концентрации на границе раздела диэлектрик-полупроводник иллюстрируется графиком, приведенным на рисунке 6.

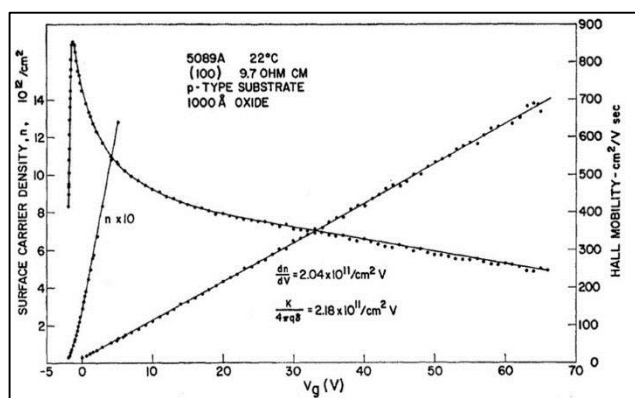


Рис. 6. Зависимость подвижности электронов в канале МДП-транзистора от напряжения на затворе [3]

Необходимо уточнить, что приведенное изложение справедливо для случая квазистационарного электростатического состояния приповерхностной

области полупроводника, которое реализуется при скоростях изменения потенциала полевого электрода, меньших темпа тепловой генерации электронно-дырочных пар.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в работе результаты моделирования характеристик МДП элемента Холла со встроенным N-каналом площадью $200 \times 200 \text{ мкм}^2$ и концентрацией легирования $N_D \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$ мкм показали, что при изменении полевого управляющего напряжения от положительных до отрицательных значений в структурах с рабочим окислом 45 нм граница раздела диэлектрик-полупроводник переходит от состояния сильного обогащения электронами до инверсии проводимости. При сильном обогащении канал проводимости формируется в виде тонкого (менее 1 мкм) приповерхностного слоя полупроводника с высокой концентрацией электронов ($n \sim 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$), а при сильной инверсии – в виде заглубленного проводящего слоя с концентрацией электронов, соответствующей уровню легирования N-кармана ($N_D \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$). При этом изменение полевого потенциала в диапазоне $\pm 5 \text{ В}$ обеспечивает возможность управляемого изменения ЭДС Холла в пределах $\sim 200\%$ при максимальных значениях $V_H \sim 4,5 \text{ мВ}$ и токовой магниточувствительности на уровне $2000 \text{ В}/(\text{А} \cdot \text{Тл})$.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность В.Н. Мордковичу, Рашиту З. Хафизову и В.Н. Ануфриеву за полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Мордкович В.Н. Датчики на основе структур «кремний на изоляторе» // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. 2008. В. 2. С. 34-45.
- [2] Малых А. А., Леонов А. В., Мордкович В. Н., Павлюк М. И. Кремниевый полевой датчик Холла с расширенным диапазоном рабочих температур // Приборы и техника эксперимента. 2016. № 5. С. 104-108.
- [3] F.F.Fang, A.B. Fowler. Transport Properties of Electrons in Inverted Silicon Surfaces // Physical Review. 1968. V. 169. P. 619-631.
- [4] V.V. Pospelov, R.A. Suris, B. I. Fouks (Fuks), R.Z. Hafizov (Khafizov). Influence of Surface States on the Charge Transfer along the Dielectric-Semiconductor Interface // Proceedings of the 3rd international conference «Technology and application of charge coupled devices». 1976. P. 31-37.
- [5] Золотарев В.И., Поспелов В.В., Фетисов Е.А., Хафизов Р.З. Исследование подвижности неосновных носителей заряда в инверсионных каналах МДП-структур // Микроэлектроника. 1974. Т.3. №.5. С.413–417.
- [6] Кандыба П.Е., Золотарев В.И., Хафизов Р.З. Влияние окисления в хлорсодержащей среде на рассеяние в инверсионных каналах МДП-структур // Микроэлектроника. 1977. Т.6. №2. С. 184-188.
- [7] Поспелов В.В., Фуks Б.И., Хафизов Р.З. Исследование холловской подвижности в скрытых каналах МДП-структур // Сб. «Физические процессы в МДП-структурах». 1976. С. 15-17.