

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

³АО «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 возможность 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 ХН035 фабрики XFAB (рис. 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 (n+ области, с размерами 5x5 мкм, глубиной 0,6 мкм и поверхностным сопротивлением 57 Ом/кв).

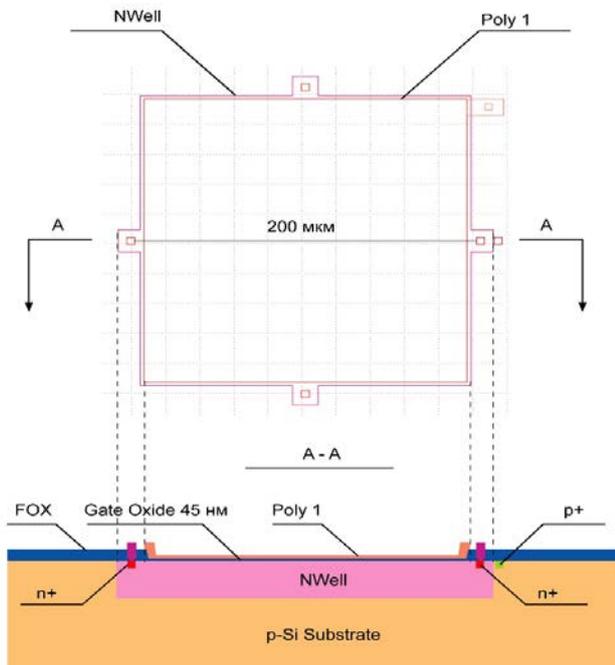


Рис. 1. Топология и структура МДП элемента Холла со встроенным каналом

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

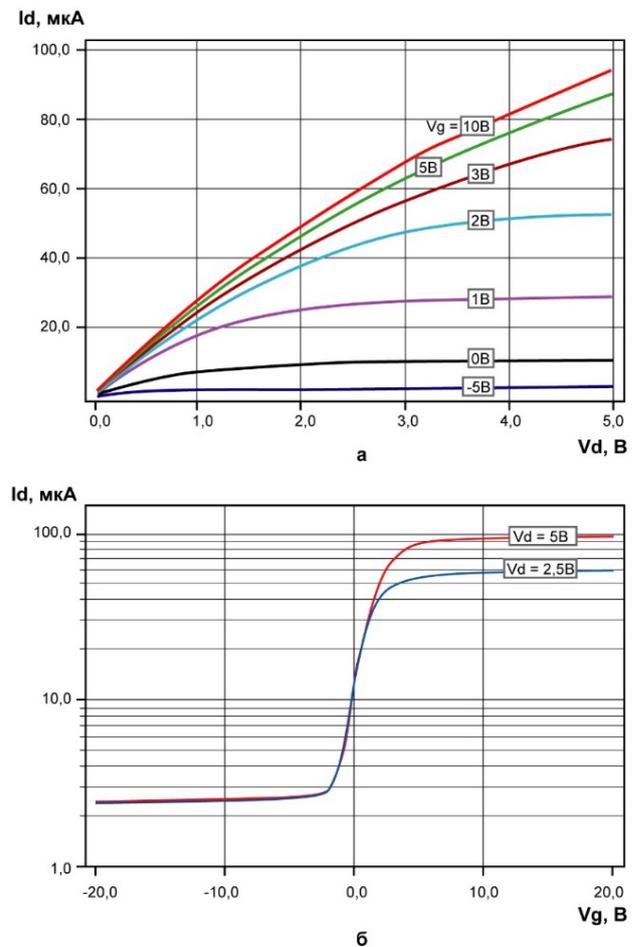


Рис. 2. Выходная (а) и сток-затворная (б) характеристики МДП элемента Холла со встроенным каналом

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 рис. 3 этот переход иллюстрируется зависимостью распределения концентрации свободных носителей заряда (электронов и дырок) по глубине N-кармана.

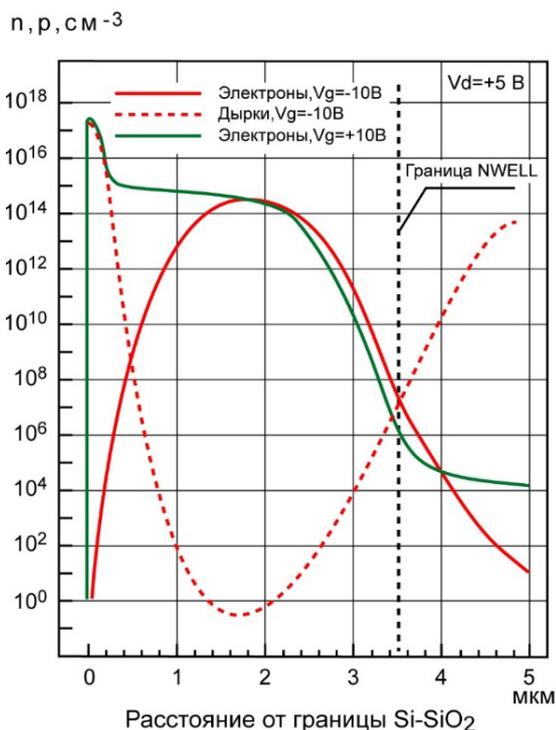


Рис. 3. Распределение концентрации электронов и дырок по глубине N-кармана

Из рисунка видно, что концентрация свободных носителей заряда на границе раздела диэлектрик-полупроводник, как электронов при сильном обогащении ($V_g = +10V$), так и дырок при сильной инверсии ($V_g = -10V$), 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 рис. 4, на котором представлена 2d иллюстрация зависимости плотности тока между истоком и стоком транзистора от расстояния от границы раздела диэлектрик-полупроводник.

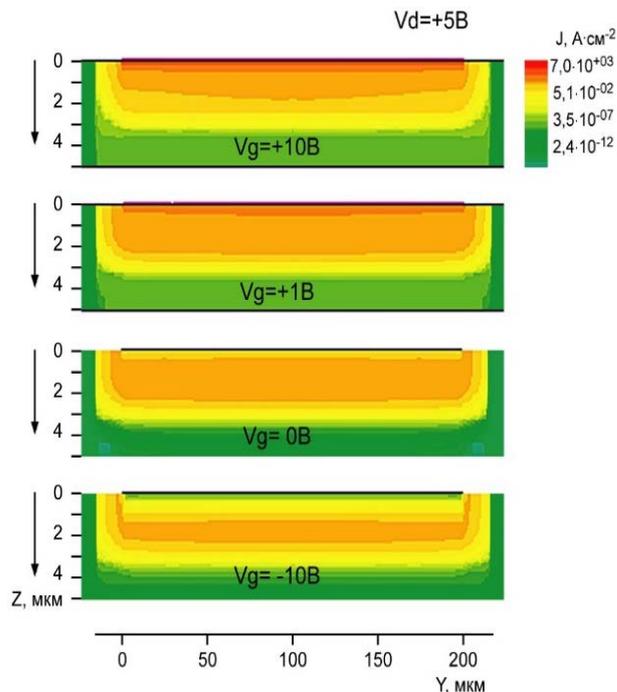


Рис. 4. Распределение плотности тока между истоком и стоком транзистора при различных значениях потенциала полевого электрода

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

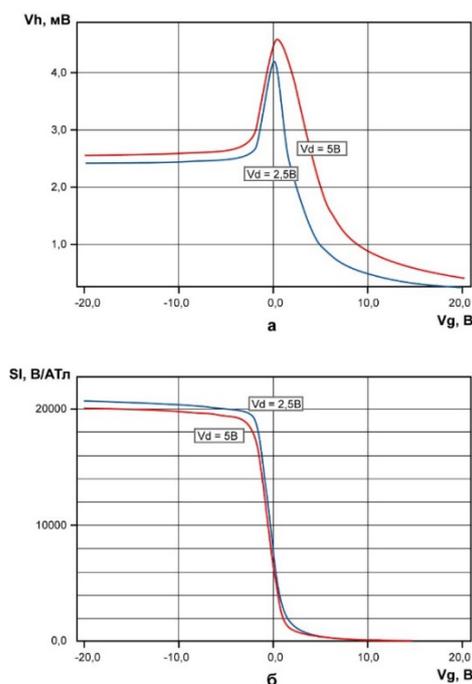


Рис. 5. Характеристики магниточувствительности элемента: зависимости ЭДС Холла (а) и токовой магниточувствительности (б) от потенциала полевого электрода при $V_d = 5$ и $2,5V$ ($B = 50 \text{ мТл}$)

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 p-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 рис. 6.

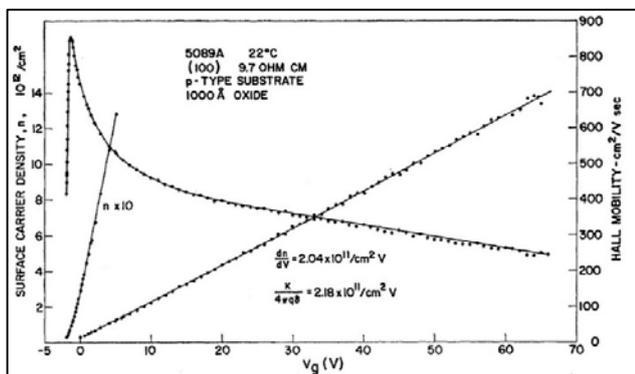


Рис. 6. Зависимость подвижности электронов в канале МДП-транзистора от напряжения на затворе [3]

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.

Numerical Simulation of N-well MOSFET Hall Element

R.Z. Khafizov¹, M.I. Pavlyuk², A.E. Timofeev³

¹GraphImpress Co Ltd, Moscow, imagelab@mail.ru

²Milandr Group, Moscow

³ZNTC JSC, Moscow

Abstract — A significant advantage of Hall silicon sensors is the use of silicon microelectronics technology for their production, which ensures the compatibility of sensor elements with interface electronics, expanding the range of their performance and application possibilities due to signal processing. In addition, the use of modern CMOS technology makes it possible to implement MOSFET Hall sensors on the basis of metal-dielectric-semiconductor structures, both with an inversion surface channel and including a built-in conductivity channel, as well as the possibility of full dielectric isolation of the sensor from the substrate and adjacent circuit elements due to the formation of sensitive elements on silicon on the insulator structures (SOI) [1,2].

MOSFET Hall sensors belong to the class of semiconductor devices, the operation of which is significantly influenced by surface effects [3,4]. In silicon Hall elements based on MOSFET transistors with inversion channel, the influence of these effects on the Hall EMF and, accordingly, on the sensitivity is determined by the dependence of charge carrier mobility on their scattering at the Si-SiO₂ interface [5]. When developing such kind of devices, the problem is solved by some ways. One of them is the development of technological processes for obtaining the Si – SiO₂ interface, which contains a minimum number of scattering centers [6]. Another way is to select structures with an electronic type of conductivity, providing the maximum value of the charge carrier mobility, as well as the formation of a built-in (buried) channel with a potential relief near the Si-SiO₂ interface, which prevents carriers to contact with the surface [7].

In this paper, the characteristics of the magnetic sensitivity of silicon Hall elements on the basis of the N-well MOSFET-transistor structures with a built-in channel are investigated by numerical modeling. The studies were carried out on model samples with axisymmetric topological design developed using design rules of 0.35 μm. The electrical power mode of the samples providing both inversion and enrichment of the semiconductor-dielectric interface was modeled. The aim of the work was to identify the ranges of field control of the functional characteristics of MOSFET Hall elements.

At positive displacements of the gate electrode, which creates a strong enrichment of the Si-SiO₂ interface, the conductivity channel is formed as a thin (less than 1 μm) surface semiconductor layer with a high electron concentration ($n \sim 5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$), and under the strong inversion is in the form of a buried conductive layer with the electron concentration corresponding to the N-well doping level ($N_d \sim 10^{15} \text{ cm}^{-3}$). The variations of field potential in the range of ±5V provide the

possibility of controllable changes of the Hall EMF in the range of ~200% at maximum values $V_H \sim 4,5 \text{ mV}$ and current-related sensitivity at 2000 V/AT.

Keywords — Hall element, Hall voltage, magnetic induction, space charge region, metal-dielectric-semiconductor (MOS) structure, Hall field sensor, CMOS technology, silicon-on-insulator (SOI) structure, integrated circuit (IC).

REFERENCES

- [1] Mordkovich V. N. Datchiki na osnove struktur «kremniy na izolyatore» (Sensors based on silicon-on-insulator structures) // Electronic Technics. Series 2. Semiconductor device. 2008. No. 2. P. 34-45.
- [2] Leonov A.V., Mordkovich V.N., Pavlyuk M.I. Kremievyy polevoy datchik Holla s rasshyrennym diapazonom rabochnih temperatur (Silicon field Hall sensor with extended operating temperature range // Instruments and Experimental Techniques. 2016. No. 5. P. 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] Zolotarev B.I., Pospelov V.V., Fetisov E.A., Khafizov R.Z. Issledovanie podvizhnosti neosnovnykh nositeley zaryada v inversionnykh kanalah MDP struktur (Study of minority charge carriers mobility in inversion channels of MOS structures) // Microelectronics. 1974.V.3. No.5. P.413-417.
- [6] Kadyba P.E., Zolotarev B.I., Khafizov R.Z. Vliyanie okisleniya v chlorsodezhaschey srede na rasseyanie v inversionnykh kanalah MDP struktur (Effect of oxidation in a chlorine-containing environment on scattering in inversion channels of MOS structures // Microelectronics. 1977. V.6. No. 2. P. 184-188.
- [7] Pospelov V.V., Fuks B. I., Khafizov R.Z. Issledovanie khollovskoy podvizhnosti v skrytykh kanalah MDP struktur (Investigation of hall mobility in buried channels of MOS structures) // Sb. Physical Processes in MOS structures. 1976. P. 15-17.