

УДК 621.315:004.94

Температурные исследования полевых датчиков Холла на основе наноразмерных гетероструктур «кремний на изоляторе»

© 2021 г. К. К. Абгарян¹✉, А. В. Леонов², Д. Л. Ревизников¹

¹ *Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление»
Российской академии наук, ул. Вавилова, д. 44, корп. 2, Москва, 119333, Россия*

² *Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов
Российской академии наук, ул. Осипьяна, д. 6, Черноголовка, 142432, Россия*

✉ Автор для переписки: kristal83@mail.ru

Аннотация. Микроэлектроника относится к числу отраслей промышленности, которые в последние десятилетия развиваются рекордно быстрыми темпами. Важнейшую роль в развитии цифровой экономики играет разработка и организация производства нового поколения микроэлектронных датчиков внешних воздействий и микросистем на их основе. В связи с необходимостью эксплуатации таких устройств в различных условиях, включая широкие температурные интервалы, определение диапазонов их надежной работы является актуальной задачей. Тепловые исследования проводились с применением построенной ранее двухуровневой математической модели полевого датчика Холла (ПДХ) на основе гетероструктуры «кремний на изоляторе» (КНИ). Представлены результаты расчетных и экспериментальных исследований влияния температуры на характеристики ПДХ КНИ. Показана возможность функционирования датчика в широком диапазоне температур. Проведена параметрическая идентификация разработанной авторами математической модели по экспериментальным данным. Определена функция чувствительности электрического тока к изменению температуры. Предложенный подход позволяет оценить требуемую чувствительность датчика для определения температуры с заданной точностью.

Ключевые слова: полевой датчик Холла, кремний на изоляторе, гетероструктура, математическое моделирование

Для цитирования: Абгарян К.К., Леонов А.В., Ревизников Д.Л. Температурные исследования полевых датчиков Холла на основе наноразмерных гетероструктур «кремний на изоляторе». *Известия вузов. Материалы электрон. техники.* 2021; 24(4): 234—241. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2021-4-234-241>

* Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на III-й международной конференции «Математическое моделирование в материаловедении электронных компонентов», Москва, 25–27 октября 2021 г.

© 2021 National University of Science and Technology MISiS.

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Temperature studies of Hall field sensors based on nanosized silicon–on–insulator heterostructures

K. K. Abgaryan¹✉, A. V. Leonov², D. L. Reviznikov¹

¹ *Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44–2 Vavilova Str., Moscow 119333, Russia*

² *Institute of Microelectronics Technology and High-Purity Materials of the Russian Academy of Sciences, 6 Academician Ossipyan Str., Chernogolovka, Moscow Region, 142432, Russia*

✉ Corresponding author: kristal83@mail.ru

Abstract. Microelectronics is one of the industries that have been developing at a record pace in recent decades. The most important role in the development of the digital economy is played by the development and organization of the production of a new generation of microelectronic sensors of external influences and microsystems based on them. Due to the need to operate such devices under various conditions, including wide temperature ranges, determining the ranges of their reliable operation is an urgent task. Thermal studies are carried out using the previously constructed two-level mathematical model of a Hall field sensor (HFS) based on a silicon–on–insulator (SOI) heterostructure. The results of computational and experimental studies of the influence of temperature on the characteristics of the SOI HFS are presented. The possibility of operation of the sensor in a wide temperature range is shown. Parametric identification of the mathematical model developed by the authors based on the experimental data is carried out. The sensitivity function of the electric current to temperature change is determined. The proposed approach makes it possible to estimate the required sensitivity of the sensor to determine the temperature with the given accuracy.

Keywords: Hall field sensor, silicon–on–insulator, heterostructure, mathematical modeling

For citation: Abgaryan K.K., Leonov A.V., Reviznikov D.L. Temperature studies of Hall field sensors based on nanosized silicon–on–insulator heterostructures. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2021; 24(4): 234–241. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2021-4-234-241>

Введение

Работа продолжает цикл исследований авторов по моделированию полупроводниковых гетероструктур [1–4]. Развивается разработанная ранее двухуровневая математическая модель полевого датчика Холла (ПДХ) на основе гетероструктуры «кремний на изоляторе» (КНИ) [5].

На сегодняшний день классические датчики Холла на основе кремния практически достигли своих предельных параметров, таких как пороговая чувствительность, рабочая температура, диапазон рабочих частот, радиационная стойкость. В то же время развитие сенсорной техники, которое продолжается ускоренными темпами [6–8], требует повышения характеристик магнитосенсоров. Решение этой проблемы может осуществляться путем использования для создания датчиков Холла новых КНИ–структур [6–13]. Такие структуры представляют собой трехслойную систему, в которой тонкий рабочий слой кремния отделен от подложки слоем диэлектрика. КНИ–технология позволяет улуч-

шить свойства датчиков Холла, поскольку она дает возможность трансформировать традиционный датчика Холла, являющийся пассивным элементом резистивного типа, в активный элемент транзисторного типа. Это обусловлено тем, что скрытый диэлектрик КНИ–структуры и Si–подложка могут быть использованы в системе «металл–диэлектрик–полупроводник» (МДП), позволяющей управлять проводимостью кремниевого слоя с помощью полевого эффекта.

Одним из важных достоинств ПДХ, изготовленного на КНИ–структуре, является возможность его работы в широком диапазоне рабочих температур. Физически это обусловлено тем, что в отличие от стандартных кремниевых датчиков Холла [14], где рабочая область отделена от подложки p – n –переходом, в ПДХ КНИ рабочая область расположена на слое диэлектрика (SiO_2), скрытого в кремниевой пластине. С ростом температуры в стандартном датчике начинается утечка тока через p – n –переход, поэтому максимальная рабочая температура таких датчиков обычно не превосхо-

дит 423 К. В то же время в ПДХ КНИ диэлектрик структуры надежно подавляет утечку носителей заряда из подложки. Причиной, ограничивающей рабочую температуру, является лишь термогенерация электронов и дырок непосредственно в рабочем теле элемента. Наличие диэлектрического слоя в КНИ-структуре, который препятствует утечке тока в подложку, позволяет ПДХ работать в диапазоне от гелиевых (криогенных) температур до температур порядка 600 К [15, 16].

Ранее авторами была разработана двухуровневая локально-одномерная вычислительная модель для расчета полевых датчиков Холла на основе КНИ-структуры с двумя управляющими затворами [5]. На первом уровне решается серия одномерных уравнений Шредингера—Пуассона, описывающих распределение плотности носителей заряда поперек гетероструктуры в различных сечениях. Полученная информация передается на второй уровень, где осуществляется расчет токовых характеристик элемента.

Ниже рассмотрены вопросы параметрической идентификации двухуровневой модели по экспериментальным данным в широком диапазоне температур.

Математическая модель

Полевой датчик Холла представляет собой гетерогенную структуру, состоящую из двух слоев диэлектрика, между которыми расположен слой легированного кремния, образующий проводящий канал. На боковых гранях канала расположены два омических контакта (1, 2) для измерения ЭДС Холла. Подробное описание ПДХ дано в работах [5, 10]. Структурная схема датчика представлена на рис. 1.

С точки зрения математического моделирования можно выделить три основных составляющих:

- расчет распределения плотности заряда в гетероструктуре;
- расчет подвижности носителей заряда;
- расчет электрического тока в проводящем канале.

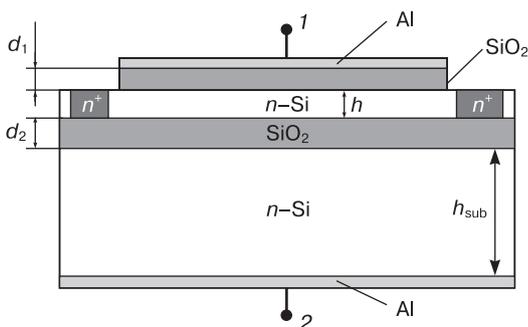


Рис. 1. Структурная схема полевого датчика Холла (ПДХ)
Fig. 1. Structural diagram of the Hall field sensor (HFS)

Соответствующая математическая модель подробно описана в работе [5]. Здесь приведем основные уравнения модели.

Модель, описывающая распределения плотности заряда поперек гетероструктуры, представляет собой систему уравнений Шредингера и Пуассона:

$$-\frac{\hbar^2}{2} \frac{d}{dz} \left(\frac{1}{m^*(z)} \frac{d\psi}{dz} \right) + V(z)\psi(z) = E\psi(z); \quad (1)$$

$$\frac{d}{dz} \left(\varepsilon(z) \frac{d\phi}{dz} \right) = -e(N_d(z) - N_a(z) - n(z)); \quad (2)$$

$$V(z) = -e\phi(z) + \Delta E_c(z); \quad (3)$$

$$n(z) = \sum_i [\psi_i(z)]^2 n_i(z); \quad (4)$$

$$n_i(z) = k_B T \frac{m^*(z)}{\pi \hbar^2} \ln \left[1 + \exp \left(\frac{E_F - E_i}{k_B T} \right) \right]. \quad (5)$$

Здесь E_i , $\psi_i(z)$ — энергетические уровни и соответствующие им волновые функции; $n(z)$ — электронная плотность; \hbar — постоянная Планка; e — заряд электрона; m^* — эффективная масса электрона; E_F — положение уровня Ферми; $\phi(z)$ — электростатический потенциал; ε — диэлектрическая постоянная материала; ΔE_c — сдвиг зоны проводимости материала; k_B — постоянная Больцмана; T — температура. Функция $u(z)$ описывает распределение легирующих примесей в системе, $N_d(z)$, $N_a(z)$ — концентрации донорной и акцепторной примесей.

На границах системы ($z = 0$, $z = H$, где H — общая толщина слоистой структуры) задаются условия равенства нулю волновых функций:

$$\psi(0) = 0; \psi(H) = 0. \quad (6)$$

Граничные условия для уравнения Пуассона имеют вид

$$\phi(0) = \phi_{b0} + \phi_{g0}; \phi(H) = \phi_{bH} + \phi_{gH}. \quad (7)$$

Здесь ϕ_b — потенциальный барьер в приконтактном слое, граничащим с затвором; ϕ_g — смещение потенциала вследствие приложенного напряжения на затворе.

Подробное описание алгоритмов решения задачи (1)—(7) дано в работах [1—3].

Выражение для расчета электрического тока в проводящем канале записывается следующим образом [17]:

$$I_D = \frac{eW}{L} \int_{u_s}^{u_d} \mu(u) N(u) du, \quad (8)$$

где L , W — длина и ширина кремниевого канала соответственно; $u = v_g - v$; v_g — значение потенциала на затворе; v — текущее значение потенциала в ка-

нале; v_d — потенциал стока; v_s — потенциал источника (полагается равным нулю); μ — подвижность электронов в канале; N — слоевая концентрация

$$\text{электронов в канале } N = \int_0^H n(z) dz.$$

Для адекватного отражения результатов измерений в вычислительных экспериментах требуется соответствующая настройка параметров модели. Центральным моментом в настройке является определение зависимости подвижности носителей заряда, входящей в выражение для расчета электрического тока в проводящем канале, от локального напряжения и температуры. Прямой расчет подвижности затруднен из-за отсутствия надежных данных по интенсивностям различных видов рассеяния электронов. Поэтому целесообразным представляется использование аппроксимационной зависимости, построенной по экспериментальным данным. Ранее мы использовали простую эмпирическую зависимость, включающую локальную разность потенциалов:

$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + \alpha u},$$

где μ_0 — объемная подвижность носителей заряда, которая для кремния принимается равной $0,13 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$; α — фактор уменьшения подвижности [18]. Такой подход позволил получить согласование с экспериментальными вольт-амперными характеристиками для определенных напряжений на затворах. Однако расширение диапазона изменения напряжений требует более точной аппроксимационной модели. С этой целью в модель введена зависимость подвижности от слоевой концентрации электронов в проводящем канале. При учете влияния температуры на подвижность принципиальным является тот факт, что при используемых в ПДХ уровнях легирования кремния изменение температуры практически не отражается на слоевой концентрации электронов. Таким образом, выражение для подвижности может быть представлено в мультипликативном виде:

$$\mu(T, N) = \mu(T)G(N).$$

Для функции $G(N)$ естественной представляется степенная параметризация $G(N) \propto N^p$. Хорошее согласование с экспериментальными данными в широком диапазоне напряжений питания и напряжений на затворах дает показатель степени $p = -1/3$.

Для параметризации функции $\mu(T)$ примем в рассмотрение следующие факты. Известно, что в примесных полупроводниках при низких температурах преобладает рассеяние электронов на ионах примеси. Оно, главным образом, лимитирует под-

вижность электронов, которая при данном виде рассеяния может быть представлена в виде

$$\mu_a = aT^\alpha.$$

Здесь $\alpha > 0$, т. е. функция подвижности является возрастающей. Для объемных полупроводников показатель степени $\alpha = 3/2$.

При повышении температуры все большую роль начинает играть рассеяние электронов на тепловых колебаниях кристаллической решетки. Подвижность электронов при таком виде рассеяния может быть представлена убывающей степенной зависимостью

$$\mu_b = bT^{-\beta},$$

где $\beta > 0$. Для объемных полупроводников показатель степени β также принимается равным $3/2$.

Таким образом, имеют место две противоречивые тенденции в поведении подвижности электронов при изменении температуры, что может приводить к появлению максимума на кривой зависимости подвижности от температуры. Об этом свидетельствуют представленные экспериментальные данные, согласно которым, максимальная подвижность наблюдается при температурах $80\text{—}120 \text{ К}$.

Для определения итоговой подвижности будем использовать правило Маттисена:

$$\mu(T) = \frac{1}{\frac{1}{\mu_a} + \frac{1}{\mu_b}} = \frac{1}{\frac{1}{a}T^{-\alpha} + \frac{1}{b}T^\beta}.$$

Переходя к относительным величинам, получим

$$\gamma(T) = \frac{\mu(T)}{\mu_*} = \frac{\frac{1}{a}T_*^{-\alpha} + \frac{1}{b}T_*^\beta}{\frac{1}{a}T^{-\alpha} + \frac{1}{b}T^\beta},$$

или

$$\gamma(T) = \frac{T_*^{-\alpha} + cT_*^\beta}{T^{-\alpha} + cT^\beta},$$

где μ_* , T_* — опорные значения подвижности и температуры.

В процессе параметрической идентификации модели необходимо определить значения параметров α , β , c , а также значение подвижности при опорных значениях температуры и концентрации носителей заряда.

Результаты расчетов и экспериментов

Температурные исследования проводили на измерительной установке (рис. 2), которая позволяет измерять характеристики ПДХ в диапазоне температур от 77 до 600 К .

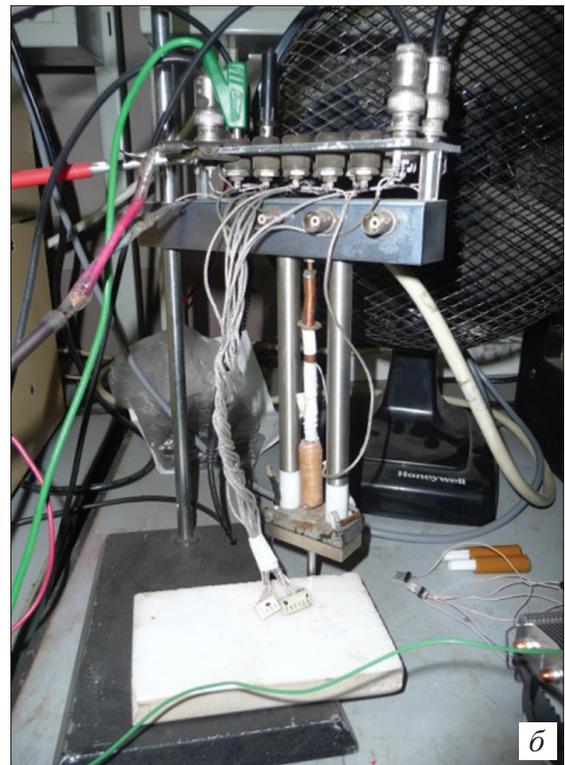
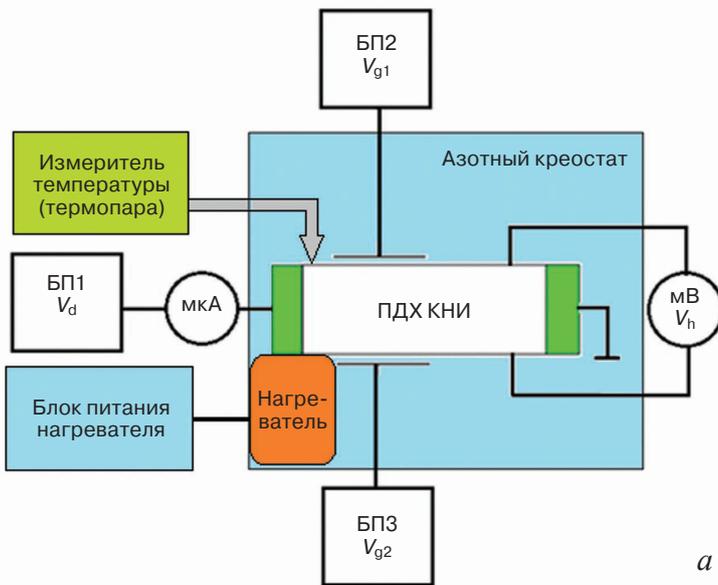


Рис. 2. Блок-схема установки для температурных измерений характеристик ПДХ (а) и нагреватель со специальной колодкой для фиксации ПДХ КНИ и катушка (б)

Fig. 2. Block diagram of the installation for temperature measurements of the characteristics of the HFS (a) and a heater with a special block for fixing the SOI HFS and a coil (b)

В экспериментах варьировали значения напряжения питания, напряжения на затворах и температуры. Получены вольт-амперные, сток-затворные и холл-затворные характеристики ПДХ (рис. 3—5).

Результаты проведенных температурных исследований позволяют сделать вывод о возможности функционирования ПДХ КНИ в широком диапазоне температур с сохранением работоспособности.

Приведенные экспериментальные данные использовались для параметрической идентификации

модели подвижности носителей заряда. Параметрический анализ показал, что значения относительной подвижности γ , близкие к наблюдаемым в экспериментах, получаются при следующих параметрах: $\alpha = 1, \beta = 1,5, c = 2,5 \cdot 10^{-5}$.

Результаты параметрической идентификации модели подвижности носителей заряда представлены на рис. 6. Экспериментальные данные при каждой температуре усреднялись по реализациям, в которых менялись напряжение питания и напряжения на затворах. Из рис. 6 видно хорошее согла-

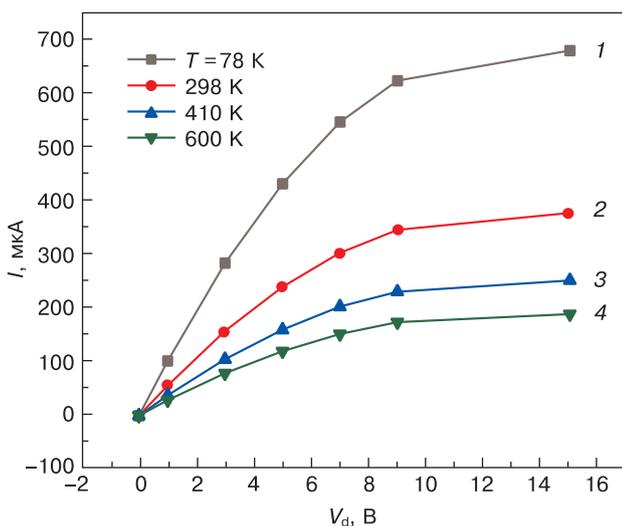


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики при различных рабочих температурах T , К: 1 — 78; 2 — 298; 3 — 410; 4 — 600. $V_{g1} = V_{g2} = 9$ В

Fig. 3. Volt-ampere characteristics at different operating temperatures T , К: (1) 78; (2) 298; (3) 410; (4) 600. $V_{g1} = V_{g2} = 9$ В

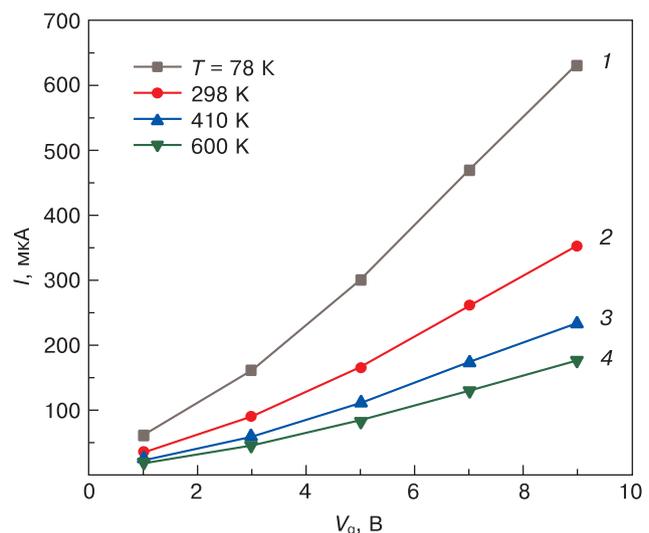


Рис. 4. Сток-затворные характеристики при различных рабочих температурах T , К: 1 — 78; 2 — 298; 3 — 410; 4 — 600. $V_d = 9$ В, $V_g = V_{g1} = V_{g2}$

Fig. 4. Drain-gate characteristics at various operating temperatures T , К: (1) 78; (2) 298; (3) 410; (4) 600. $V_d = 9$ В, $V_g = V_{g1} = V_{g2}$

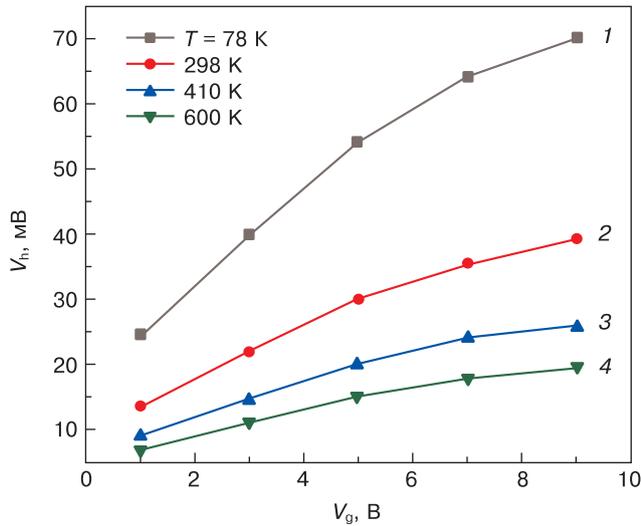


Рис. 5. Холл–затворные характеристики при различных рабочих температурах T , К: 1 — 78; 2 — 298; 3 — 410; 4 — 600. $V_d = 9$ В, $V_g = V_{g1} = V_{g2}$

Fig. 5. Hall–shutter characteristics at various operating temperatures T , K: (1) 78; (2) 298; (3) 410; (4) 600. $V_d = 9$ V, $V_g = V_{g1} = V_{g2}$

сование расчетных и экспериментальных данных при температурах выше 150 К. При низких температурах наблюдается различие: расчетная кривая демонстрирует более интенсивное убывание подвижности при уменьшении температуры. При этом количественное различие в диапазоне температур 60—100 К не превышает 15 %.

Как отмечалось выше, для проведения расчетов требуется знать значение подвижности при опорных значениях температуры и концентрации носителей заряда. Эта величина также может быть идентифицирована по экспериментальным данным. Применительно к рассматриваемому ПДХ

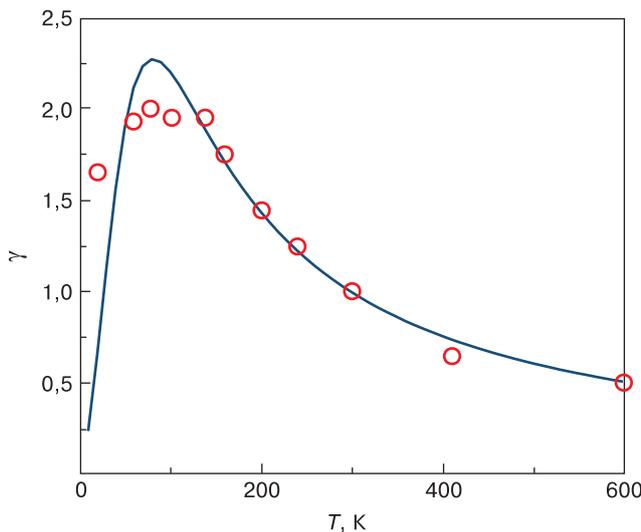


Рис. 6. Зависимость относительной подвижности от температуры. Сплошная кривая — расчет; «○» — эксперимент

Fig. 6. Dependence of relative mobility on temperature. The solid curve is the calculation; ○ is the experiment

в качестве опорного значения подвижности берется $0,13 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, что соответствует объемной подвижности носителей заряда при комнатной температуре и концентрации носителей 10^{15} м^{-3} .

На рис. 7 показаны рассчитанные с использованием найденных параметров сток–затворные характеристики ПДХ при различных температурах. Сравнение с графиками на рис. 4 показывает хорошее согласование расчетных и экспериментальных кривых при высоких температурах (кривые 2—4). При низких температурах (кривая 1) расчетная характеристика проходит выше экспериментальной, что связано с более высокой относительной подвижностью в этой области (см. рис. 6).

Представленный подход позволяет оценить возможность использования ПДХ в качестве датчика температуры. С этой целью вычислим чувствительность тока к изменению температуры, продифференцировав зависимость $\gamma(T)$:

$$\eta(T) = \frac{\partial \gamma}{\partial T} = -\frac{T_*^{-\alpha} + cT_*^\beta}{(T^{-\alpha} + cT^\beta)^2} (-\alpha T^{-(\alpha+1)} + c\beta T^{\beta-1}).$$

График функции чувствительности $\eta(T)$ приведен на рис. 8.

Таким образом, можно оценить требуемую чувствительность датчика для определения температуры с заданной точностью.

Заклучение

Экспериментальные исследования токовых характеристик ПДХ позволяют сделать вывод о возможности функционирования ПДХ КНИ в широком диапазоне температур с сохранением работоспособности.

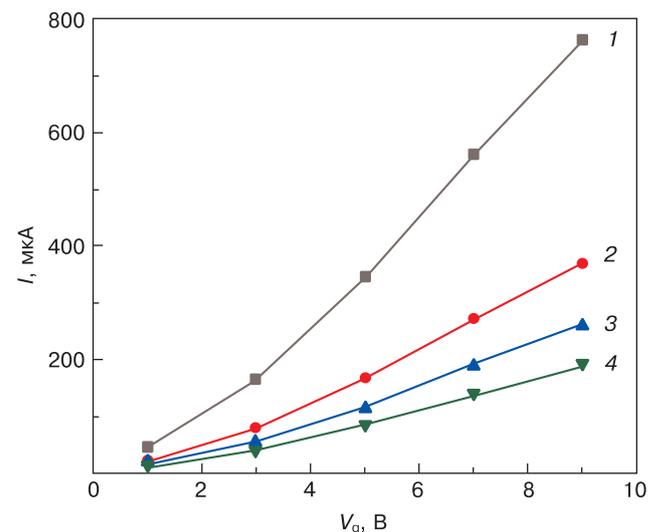


Рис. 7. Расчетные сток–затворные характеристики при различных температурах T , К: 1 — 78; 2 — 298; 3 — 410; 4 — 600

Fig. 7. Estimated drain–gate characteristics at various temperatures T , K: (1) 78; (2) 298; (3) 410; (4) 600

Проведена параметрическая идентификация разработанной авторами математической модели по экспериментальным данным. Предложена аппроксимационная зависимость подвижности носителей заряда от температуры и концентрации. Результаты расчетов согласуются с экспериментальными данными в широком диапазоне температур, напряжений питания и напряжений на затворах.

Определена функция чувствительности электрического тока к изменению температуры. Такой подход позволяет оценить требуемую чувствительность датчика для определения температуры с заданной точностью.

Библиографический список

1. Абгарян К.К., Ревизников Д.Л. Вычислительные алгоритмы в задачах моделирования и оптимизации полупроводниковых гетероструктур. М.: МАКС Пресс; 2016, 120 с.
2. Абгарян К.К., Ревизников Д.Л. Численное моделирование распределения носителей заряда в наноразмерных полупроводниковых гетероструктурах с учетом поляризационных эффектов. *Журнал вычислительной математики и математической физики*. 2015; 56(1): 153—164. <https://doi.org/10.7868/S004446691601004X>
3. Abgaryan K.K., Mutigullin I.V., Reviznikov D.L. Computational model of 2DEG mobility in the AlGaIn/GaN heterostructures. *Physica Status Solidi (c)*. 2015; 12(4–5): 460—465. <https://doi.org/10.1002/PSSC.201400200>
4. Abgaryan K.K., Mutigullin I.V., Reviznikov D.L. Theoretical investigation of 2DEG concentration and mobility in the AlGaIn/GaN heterostructures with various Al concentrations. *Physica Status Solidi (c)*. 2015; 12(12): 1376—1382. <https://doi.org/10.1002/PSSC.201510159>
5. Mordkovich V.N., Abgaryan K.K., Reviznikov D.L., Leonov A.V. Simulation of hall field elements based on nano-sized silicon-on-insulator heterostructures. *Russian Microelectronics* 2021; 50(8): 617—622. <https://doi.org/10.1134/S1063739721080059>
6. Мордкович В.Н. Датчики на основе структур «кремний на изоляторе». *Электронная техника. Серия 2: Полупроводниковые приборы*. 2008; 2(221): 34—44.
7. Huijsing I.H. Smart Sensor Systems: Why? Where? How? G.C.M. Meiyer, ed. Great Britain: I. Wiley and Sons; 2008. 385 p. <https://doi.org/10.1002/9780470866931.CH1>
8. Balakrishnan V., Phan H.-P., Dinh T., Dao DV., Nguyen N.-T. Sensors for harsh environments. *Sensors*. 2017; 17(9): 2060—2092. <https://doi.org/10.3390/s17092061>
9. Baumgartner A., Ihn T., Ensslin K., Papp G., Peeters F., Maranowski K., Gossard A.C. Classical Hall effect in scanning gate experiments. *Physical Review B*. 2006. 74: 165426. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.74.165426>
10. Щербачев К.Д., Бублик В.Т., Мордкович В.Н., Пажин Д.М. Особенности образования радиационных дефектов в слое кремния структур «кремний на изоляторе». *Физика и техника полупроводников*. 2011; 45(6): 754—758.

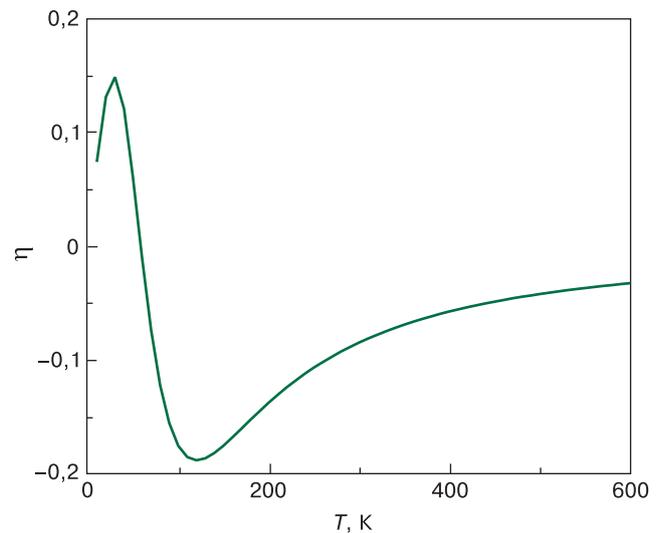


Рис. 8. Зависимость чувствительности от температуры
Fig. 8. Dependence of sensitivity on temperature

11. Громов Д.В., Мордкович В.Н., Пажин Д.М., Скобобогатов П.К. Релаксационные эффекты в полевых датчиках Холла при воздействии импульса ионизирующего облучения. *Электронная техника. Серия 2: Полупроводниковые приборы*. 2011; 1(226): 19—26.
12. Королев М.А., Козлов А.В., Петрунина С.С. Особенности функционирования полевого датчика Холла на основе КНИ структур, предназначенного для работы в телекоммуникационных сетях. *Труды МФТИ*. 2015; 7(3): 91—95.
13. Королев М.А., Павлюк М.И., Девликанова С.С. Физическая модель полевого датчика Холла на основе КНИ-структуры. *Известия высших учебных заведений. Электроника*. 2017; 22(2): 166—170. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2017-22-2-166-170>
14. Popovich R.S. Hall effect devices. 2nd. ed. Bristol; Philadelphia: Institute of Physics; 2004. 419 p.
15. Леонов А.В., Малых А.А., Мордкович В.Н., Павлюк М.И. Тонкопленочный кремниевый магниточувствительный полевой транзистор холловского типа с расширенным до 350 °С диапазоном рабочих температур. *Письма в журнал технической физики*. 2016; 42(2): 30—36.
16. Leonov A.V., Malykh A.A., Mordkovich V.N., Pavlyuk M.I. Field controlled Si hall element with extended operation temperature range from liquid helium temperature up to 650 K. *Procedia Engineering*. 2015; 120: 1197—1200. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2015.08.786>
17. Stengel F., Noor Mohammad S., Morkoc H. Theoretical investigation of electrical characteristics of AlGaIn/GaN modulation doped field-effect transistors. *Journal of Applied Physics*. 1996; 80(5): 3031—3042. <https://doi.org/10.1063/1.363162>
18. Наумова О.В., Зайцева Э.Г., Фомин Б.И., Ильницкий М.А., Попов В.П. Зависимость подвижности электронов в режиме обогащения от их плотности в полностью обедняемых пленках кремний-на-изоляторе. *Физика и техника полупроводников*. 2015; 49(10): 1360—1365.

References

1. Abgaryan K.K., Reviznikov D.L. Computational algorithms in problems of simulation and optimization of semiconductor heterostructures. Moscow: MAKS Press; 2016, 120 p. (In Russ.)
2. Abgaryan K.K., Reviznikov D.L. Numerical simulation of the distribution of charge carrier in nanosized semiconductor heterostructures with account for polarization effects. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2015; 56(1): 153—164. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S004446691601004X>
3. Abgaryan K.K., Mutigullin I.V., Reviznikov D.L. Computational model of 2DEG mobility in the AlGaIn/GaN heterostructures. *Physica Status Solidi (c)*. 2015; 12(4–5): 460—465. <https://doi.org/10.1002/PSSC.201400200>
4. Abgaryan K.K., Mutigullin I.V., Reviznikov D.L. Theoretical investigation of 2DEG concentration and mobility in the AlGaIn/GaN heterostructures with various Al concentrations. *Physica Status Solidi (c)*. 2015; 12(12): 1376—1382. <https://doi.org/10.1002/PSSC.201510159>
5. Mordkovich V.N., Abgaryan K.K., Reviznikov D.L., Leonov A.V. Simulation of hall field elements based on nanosized silicon-on-insulator heterostructures. *Russian Microelectronics*. 2021; 50(8): 617—622. <https://doi.org/10.1134/S1063739721080059>
6. Mordkovich V.N. Sensors based on “silicon on insulator” structures. *Elektronnaya Tekhnika. Seriya 2: Poluprovodnikovye Pribory*. 2008; 2(221): 34—44. (In Russ.)
7. Meiyer G.C.M., ed. Huijsing I.H. Smart Sensor Systems: Why? Where? How? Great Britain: I. Wiley and Sonus; 2008. 385 p. <https://doi.org/10.1002/9780470866931.CH1>
8. Balakrishnan V., Phan H.-P., Dinh T., Dao D.V., Nguyen N.-T. Sensors for harsh environments. *Sensors*. 2017; 17(9): 2060—2092. <https://doi.org/10.3390/s17092061>
9. Baumgartner A., Ihn T., Ensslin K., Papp G., Peeters F., Maranowski K., Gossard A.C. Classical Hall effect in scanning gate experiments. *Physical Review B*. 2006. 74: 165426. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.74.165426>
10. Shcherbachev K.D., Bublik V.T., Mordkovich V.N., Pazhin D.M. Specific features of formation of radiation defects in the silicon layer in “silicon-on-insulator” structures. *Semiconductors*. 2011; 45(6): 754—758. (In Russ.)
11. Mordkovich V.N., Pazhin D.M., Gromov D.V., Skorobogatov P.C. Relaxation effects in field hall sensor influence of impulse ionizing irradiation. *Elektronnaya Tekhnika. Seriya 2: Poluprovodnikovye Pribory*. 2011; 1(226): 19—26. (In Russ.)
12. Korolev M.A., Kozlov A.V., Petrunina S.S. Functioning features of the SOI field-effect hall sensor designed for application in telecommunications networks. *Trudy MFTI*. 2015; 7(3): 91—95. (In Russ.)
13. Korolev M.A., Pavlyuk M.I., Devlikanova S.S. Physical model of SOI field-effect hall sensor. *Proceedings of Universities. Electronics*. 2017; 22(2): 166—170. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2017-22-2-166-170>
14. Popovich R.S. Hall effect devices. 2nd. ed. Bristol; Philadelphia: Institute of Physics; 2004. 419 p.
15. Leonov A.V., Malykh A.A., Mordkovich V.N., Pavlyuk M.I. Thin-film silicon magnetically sensitive field-effect transistor of the Hall type with an extended operating temperature range up to 350 °C. *Technical Physics Letters*. 2016; 42(2): 30—36. (In Russ.)
16. Leonov A.V., Malykh A.A., Mordkovich V.N., Pavlyuk M.I. Field controlled Si hall element with extended operation temperature range from liquid helium temperature up to 650 K. *Procedia Engineering*. 2015; 120: 1197—1200. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2015.08.786>
17. Stengel F., Noor Mohammad S., Morkoc H. Theoretical investigation of electrical characteristics of AlGaIn/GaN modulation doped field-effect transistors. *Journal of Applied Physics*. 1996; 80(5): 3031—3042. <https://doi.org/10.1063/1.363162>
18. Naumova O.V., Zaitseva E.G., Fomin B.I., Il-nitsky M.A., Popov V.P. Density dependence of electron mobility in the accumulation mode for fully depleted soi films. *Semiconductors*. 2015; 49(10): 1360—1365. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Абгарян Каринэ Карленовна — доктор физ.-мат. наук, главный научный сотрудник, зав. отделом, Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, ул. Вавилова, д. 44, корп. 2, Москва, 119333, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-0059-0712>; e-mail: kristal83@mail.ru

Леонов Алексей Владимирович — канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник; Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук, ул. Осипьяна, д. 6, Черноголовка, 142432, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-3437-9501>

Ревизников Дмитрий Леонидович — доктор физ.-мат. наук, профессор; Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, ул. Вавилова, д. 44, корп. 2, Москва, 119333, Россия; <https://orcid.org/0000-0003-0998-7975>; e-mail: reviznikov@gmail.com

Karine K. Abgaryan — Dr. Sci. (Phys.-Math.), Chief Researcher, Head of Department, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44–2 Vavilova Str., Moscow 119333, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-0059-0712>; e-mail: kristal83@mail.ru

Alexey V. Leonov — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Researcher; Institute of Microelectronics Technology and High-Purity Materials of the Russian Academy of Sciences, 6 Academician Ossipyan Str., Chernogolovka, Moscow Region, 142432, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-3437-9501>

Dmitry L. Reviznikov — Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor; Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44–2 Vavilova Str., Moscow 119333, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-0998-7975>; e-mail: reviznikov@gmail.com

Поступила в редакцию 24.12.2021; поступила после доработки 12.01.2022; принята к публикации 21.01.2022
Received 24 December 2021; Revised 12 January 2022; Accepted 21 January 2022