

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И МАТЕРИАЛОВ

## SIMULATION OF PROCESSES AND MATERIALS

Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2020. Т. 23, № 2. С. 109—115.  
DOI: 10.17073/1609-3577-2020-2-109-115

УДК 621.315.617.5

### Моделирование полевых элементов Холла на основе наноразмерных гетероструктур «кремний на изоляторе»

© 2020 г. В. Н. Мордкович<sup>1</sup>, К. К. Абгарян<sup>2,3,§</sup>, Д. Л. Ревизников<sup>2,3</sup>, А. В. Леонов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН,  
ул. Акад. Осипьяна, д. 6, Черноголовка, Московская обл., 142432, Россия*

<sup>2</sup> *Вычислительный центр им. А. А. Дородницына Федерального исследовательского центра  
«Информатика и управление» Российской академии наук,  
ул. Вавилова, д. 44, корп. 2, Москва, 119333, Россия*

<sup>3</sup> *Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
Волоколамское шоссе, д. 4, Москва, 125993, Россия*

**Аннотация.** Статья посвящена вопросам численного моделирования полевых датчиков Холла (ПДХ) на основе структуры «кремний на изоляторе» с двумя управляющими затворами. Для решения задачи применяется двухуровневая локально–одномерная вычислительная модель. 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. Результаты численного моделирования сопоставляются с экспериментальными данными, полученными для полевых датчиков Холла. Сравнительный анализ показывает хорошее согласование расчетных и экспериментальных данных. Разработанная компьютерная модель позволяет оперативно проводить многовариантный анализ различных структур ПДХ, что создает основу для оптимизации устройств рассматриваемого класса.

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

#### Введение

Датчики магнитного поля, относятся к числу наиболее востребованных в самых различных общегражданских и специальных применениях (автоматика, робототехника, электротехника, авто-, авиа- и космическая радиоэлектронная аппаратура, бытовая техника, интернет вещей (*internet of things*, IoT) и т. д.). Ежегодно в мире объем их производства исчисляется миллиардами штук и возрастает

примерно на 10 %. Существенно, что переход к цифровой экономике требует не только увеличения объема производства микроэлектронных датчиков, но и улучшения их характеристик. В частности это относится к повышению чувствительности и эксплуатационной надежности, а также к уменьшению энергопотребления.

В настоящее время датчики, основанные на эффекте Холла, широко используются в промышленности, в частности, для устройств с низкой потребляемой мощностью. Также такие датчики применяются для измерения тока, определения положения объектов в пространстве и бесконтактного переключения.

В последнее время появились полевые датчики Холла на основе структуры «кремний на изоляторе» (**КНИ**), обладающие двумя управляющими за-

**Мордкович Виктор Наумович**<sup>1</sup> — доктор физ.-мат. наук, главный научный сотрудник; **Абгарян Каринэ Карленовна**<sup>2,3,§</sup> — доктор физ.-мат. наук, заведующая отделом, e-mail: kristal83@mail.ru; **Ревизников Дмитрий Леонидович**<sup>2,3</sup> — доктор физ.-мат. наук, профессор, e-mail: reviznikov@gmail.com; **Леонов Алексей Владимирович**<sup>1</sup> — канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник

§ Автор для переписки

творами, которые получили название КНИ полевые датчики Холла (**КНИ ПДХ**) [1—5]. Использование КНИ структур в качестве исходного материала для формирования тонкопленочного кремниевого транзистора, в которых одной из полевых управляющих систем используется подложка и скрытый диэлектрический слой КНИ структуры, позволило создать новый тип датчиков. Основными преимуществами таких датчиков являются: уменьшение рабочего тока (при полностью открытом канале порядка 0,1...0,4 мА), реализация максимальной пороговой чувствительности путем повышения отношения сигнал/шум, высокая устойчивость к воздействию радиации за счет использования КНИ структуры, минимизация величины остаточного напряжения путем изменения величины затворного смещения, расширение функциональных возможностей [6—8]. Одним из важнейших достоинств КНИ приборов является возможность функционирования при таких высоких рабочих температурах, которые недоступны их кремниевым аналогам. Это преимущество связано с наличием диэлектрического слоя в КНИ структуре, предотвращающего утечки тока из слоя кремния в подложку [9, 10].

Статья посвящена разработке и тестированию на экспериментальных данных компьютерной модели, позволяющей оперативно рассчитывать вольт-амперные и ток-затворные характеристики полевых датчиков Холла с учетом квантовых эффектов в гетероструктуре.

### Физическая и математическая модели

Полевой элемент (датчик) Холла (**ПДХ**) представляет собой тонкопленочный транзистор с двухзатворной управляющей системой типа металл — диэлектрик — кремний — диэлектрик — металл со встроенным  $n^+—n—n^+$ -каналом, причем на боковых гранях канала сформированы два противоположащих  $n^+$  омических (холловских) контакта, предназначенных для измерения ЭДС Холла. Схема полевого элемента Холла представлена на рис. 1. ПДХ изготавливается по технологии «кремний на изоляторе». При формировании фронтальной металл — диэлектрик — полупроводник системы используется стандартный процесс термического окисления Si и формирование на окисле электрода затвора (на основе легированного поликристаллического Si). В качестве второй (нижней) управляющей системы используется слой скрытого диэлектрика ( $\text{SiO}_2$ ) КНИ структуры и Si подложка, металлизированная на поверхности.

ПДХ может функционировать как в режиме обогащения поверхностных областей электронами, так и в режиме обеднения электронами. Выбор режима определяет величину и форму магнитоиндуцированного сигнала, управляемого знаком и

величиной потенциала полевых затворов (положительный потенциал — обогащение, отрицательный — обеднение). В режиме обогащения ПДХ по сути дела представляет собой систему из двух параллельно соединенных транзисторов, каналы которых, прилегающие к  $\text{SiO}_2—\text{Si}$ -интерфейсам, разделены областью Si, частично обедненной электродами. Представленные далее результаты получены в основном в режиме транзистора с обогащением, поскольку в этом режиме основные характеристики ПДХ существенно превосходят характеристики традиционных кремниевых элементов Холла и магнитополевых МОП транзисторов с индуцированным каналом.

Отметим, что в отличие от МОП-транзистора, в ПЭХ принципиально важна магнито-передаточная характеристика, т. е. зависимость ЭДС Холла  $V_x$  от знака и величины потенциалов затворов. Известно, что  $V_x \approx I \cdot B$ , где  $I$  — ток через элемент Холла;  $B$  — величина магнитной индукции. В ПДХ общий

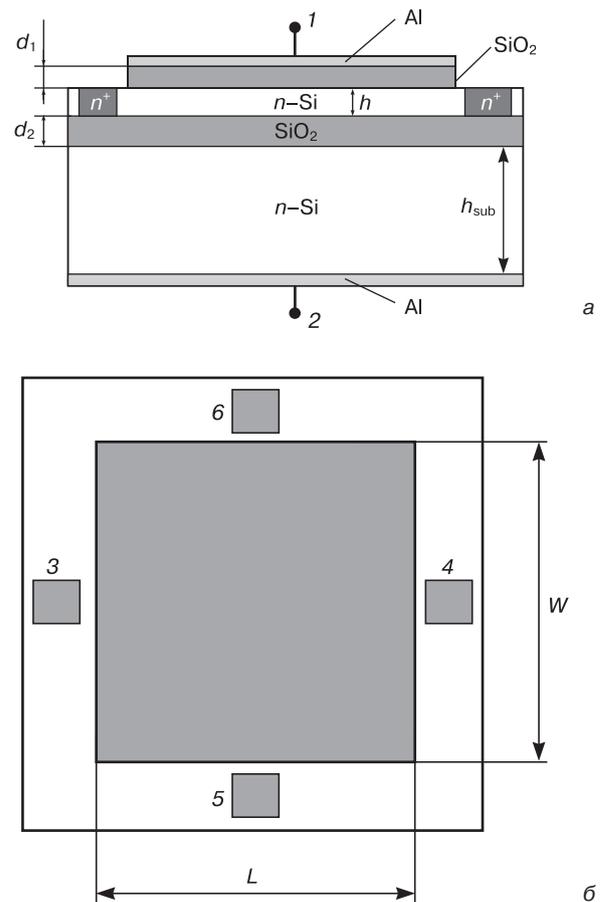


Рис. 1. Гетероструктура диэлектрик — кремний — диэлектрик:

а — поперечное сечение; б — вид сверху;

1, 2 — контакты верхнего и нижнего затворов; 3, 4 — токовые (омические) контакты; 5, 6 — боковые измерительные контакты

Fig. 1. Heterostructure dielectric — silicon — dielectric: (a) cross section, (b) top view: (1, 2) contacts of the upper and lower gates, (3, 4) current (ohmic) contacts, (5, 6) side measuring contacts

ток зависит от токов, протекающих через обогащенные области, причем в каждой из которых ток зависит не только от потенциала собственного затвора, управляющего проводимостью расположенного вблизи соответствующей поверхности канала обогащенной области, но и от потенциала другого затвора (так называемый эффект зарядовой связи, зависящий от толщины Si слоя, концентрации доноров и напряжения питания). Кроме того, как правило, толщина SiO<sub>2</sub> под фронтальным затвором существенно меньше, чем толщина слоя скрытого диэлектрика КНИ-структуры (в экспериментах это различие может составлять 20 и 400 нм соответственно). Следовательно, ПДХ не является осесимметричным прибором, и характеристики «верхнего» и «нижнего» аккумулярованных каналов могут существенно различаться.

При проектировании и оптимизации ПДХ необходимо учитывать большое количество взаимовлияющих параметров. Речь идет о сочетании конструктивных и геометрических параметров, физических свойствах канала, подложки, диэлектрических слоев и SiO<sub>2</sub>—Si-интерфейсов, диапазона напряжения питания и потенциалов управляющих затворов. Существенно, что выбор этих параметров во многих случаях осложняется их взаимозависимостью. Экспериментальное определение их значений требует длительных и неоправданно дорогостоящих экспериментов.

В этой связи актуальным представляется применение вычислительной модели ПДХ, учитывающей многообразие взаимовлияющих факторов. В ВЦ ФИЦ ИУ РАН была разработана многомасштабная вычислительная модель для расчета многослойных полупроводниковых структур, которая показала достаточно высокую точность моделирования как в плане расчета концентрации носителей в двумерном электронном газе, так и касательно подвижности электронов [11—14]. В настоящей работе эта модель была модифицирована применительно к расчету полевых элементов Холла.

Ключевую роль в анализе играет распределение плотности носителей заряда поперек слоистой структуры. Математическая модель, описывающая это распределение, представляет собой систему уравнений Шредингера и Пуассона [15]:

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

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

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

$$n(z) = \sum_i (\psi_i(z))^2 n_i(z), \quad (4)$$

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

Здесь  $E_i$  и  $\psi_i(z)$  — 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;  $\varepsilon$  — диэлектрическая постоянная материала;  $\Delta E_c$  — 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, соответственно. В модели (1)—(5) отражен тот факт, что значения  $m^*$ ,  $\varepsilon$  и  $\Delta E_c$  могут меняться от слоя к слою. При этом температура в гетероструктуре предполагается постоянной.

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

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

Также на границах задается смещение  $\phi_g$  вследствие приложенного напряжения на затворе. Кроме того, возможно задание потенциального барьера  $\phi_b$ , образующегося в приконтактном слое, граничащим с затвором. Таким образом, граничные условия для уравнения Пуассона имеют вид:

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

Решение спектральной задачи (1) (уравнение Шредингера) зависит от электростатического потенциала  $\phi$ , распределение которого в структуре  $\phi(z)$  определяется уравнением Пуассона (2). При этом в правую часть уравнения Пуассона входит электронная плотность  $n(z)$ , которая, в свою очередь, определяется энергетическими уровнями  $E_i$  и волновыми функциями  $\psi_i(z)$  согласно статистике Ферми—Дирака (4), (5). Самосогласованное решение этой системы дает искомые энергетические уровни  $E_i$  и соответствующие им волновые функции  $\psi_i(z)$ , профиль потенциальной ямы  $V(z)$ , а также распределение электронной плотности в гетероструктуре  $n(z)$ .

Алгоритмы решения задачи (1)—(7) подробно изложены в работе [11, 12]. Основные вычислительные сложности связаны со сходимостью глобальных итераций, необходимых для согласования решений уравнений Шредингера и Пуассона. С целью ускорения вычислительного процесса был реализован подход, основанный на аппроксимации нелинейной зависимости электронной плотности от потенциала в сочетании с линеаризацией уравнения Пуассона.

Полученная информация поступает в модель следующего масштабного уровня, где осуществляется расчет токовых характеристик элемента. Ток в проводящем канале рассчитывается следующим образом [16]:

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

где  $L$ ,  $W$  — длина и ширина кремниевого канала;  $u = v_g - v$ ,  $v_g$  — значение потенциала на затворе,  $v$  — текущее значение потенциала в канале;  $u_s$  — потенциал источника (полагается равным нулю);  $u_d$  — потенциал стока;  $\mu$  — подвижность электронов в канале;  $N$  — слоевая концентрация электронов

в канале  $N = \int_0^H n(z)dz$ .

Подвижность электронов в канале определяется различными механизмами рассеяния. При этом существенный вклад в ограничение подвижности вносит рассеяние на границе Si—SiO<sub>2</sub>, интенсивность которого зависит от близости центра распределения электронной плотности к границе [17]. Последняя, в свою очередь, зависит от разности потенциалов  $u$ , что учтено в выражении для расчета подвижности:

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

где  $\mu_0$  — объемная подвижность носителей заряда, которая для кремния принимается равной 0,13 м<sup>2</sup>/(В·с);  $\alpha$  — фактор уменьшения подвижности, принимаемый равным 0,5 [18]. Математическая модель, таким образом, имеет локально одномерный характер, продольное распределение слоевой концентрации электронов определяется в результате решения серии одномерных задач (1)—(7) с различными граничными условиями, после чего рассчитывается ток в проводящем канале. Такой подход в сочетании с оптимизированным алгоритмом нахождения самосогласованного решения уравнений Шредингера—Пуассона позволяет довольно оперативно рассчитывать вольт-амперные и ток-затворные характеристики ПДХ, что создает основу для многовариантного анализа и оптимизации рассматриваемых устройств.

### Результаты экспериментов и численного моделирования

Эксперименты проводились на образце ПЭХ, изготовленном в ИПТМ РАН. Параметры образца следующие (рис. 1): толщина рабочего слоя кремния  $h = 194$  нм, концентрация доноров в Si —  $5 \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup>, толщина верхнего подзатворного диэлектрика (SiO<sub>2</sub>)  $d_1 = 342$  нм, толщина скрытого диэлектрика КНИ-структуры (SiO<sub>2</sub>)  $d_2 = 323$  нм,

толщина подложки  $h_{\text{sub}} = 400$  мкм; длина кремниевого канала  $L = 500$  мкм, ширина кремниевого канала  $W = 500$  мкм. Размеры контактов (3, 4, 5, 6) —  $10 \times 10$  мкм<sup>2</sup>.

На рис. 2 приведено фото сечения КНИ ПДХ.

Верхний затвор изготовлен из сильнолегированного поликристаллического кремния, слой SiO<sub>2</sub> выращен термическим окислением. Нижний затвор состоит из Si подложки, на внешней поверхности которого нанесен металлический контакт, слой SiO<sub>2</sub> изготовлен методом имплантации кислорода и последующего отжига. ПДХ КНИ собран в стандартном металлкерамическом корпусе (рис. 3). Размер кристалла составляет  $500 \times 500$  мкм<sup>2</sup>.

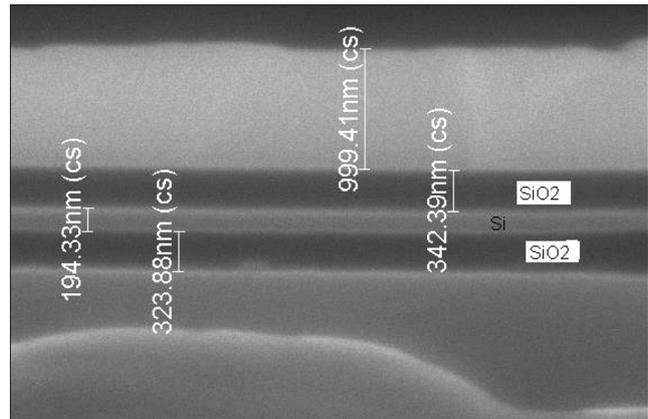


Рис. 2. РЭМ фотография структуры МДПДМ ПДХ  
Fig. 2. SEM photograph of the structure of MDPDM PDH

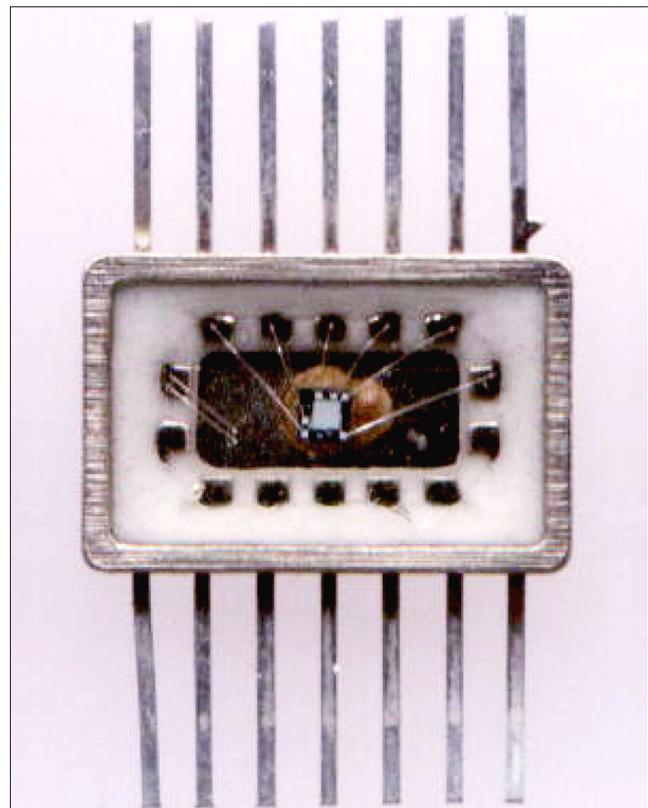


Рис. 3. Фото ПДХ КНИ в металлкерамическом корпусе  
Fig. 3. Photo of PDH SOI in a metal-ceramic case

В экспериментах варьировались величины напряжений на затворах, получены вольт–амперные, ток–затворные и холл–затворные характеристики ПДХ. Здесь остановимся на сравнении вольт–амперных характеристик, полученных экспериментально и численно. В расчетах полагалось, что потенциалы плоских зон на обеих сторонах структуры одинаковы и равны — 1,5 В. Нижний затвор, состоящий из Si подложки, на внешней поверхности которого нанесен металлический контакт, рассматривался как металлический контакт. При этом не учитывается, что в реальности у границ окисла с подложкой существует область объемного заряда такая же, как в канале ПДХ, в которой в рабочих режимах повышена концентрация электронов.

Рассмотрим вариант, когда на затвор подается напряжение 5 В. При этом возможны случаи, когда на обоих затворах потенциалы равны, и когда на одном из затворов потенциал равен нулю. На рис. 4

приведены распределения электронной плотности по толщине проводящего канала в различных продольных сечениях. Штриховой кривой на рис. 4, а показано распределение, соответствующее несимметричной подаче напряжения на затворы, когда потенциал на нижнем затворе равен нулю. Видно, что мере движения от истока к стоку электронная плотность выравнивается по толщине канала и ее уровень постепенно понижается.

Из рис. 5 видно, что расчетные и экспериментальные данные неплохо согласуются. Отметим, что для случаев несимметричной подачи напряжения на затворы результаты очень близки, а полученные токи значительно ниже, чем в варианте с симметричной подачей напряжения на затворы, что является следствием существенного уменьшения электронной плотности у поверхности с нулевым потенциалом (см. рис. 4, а).

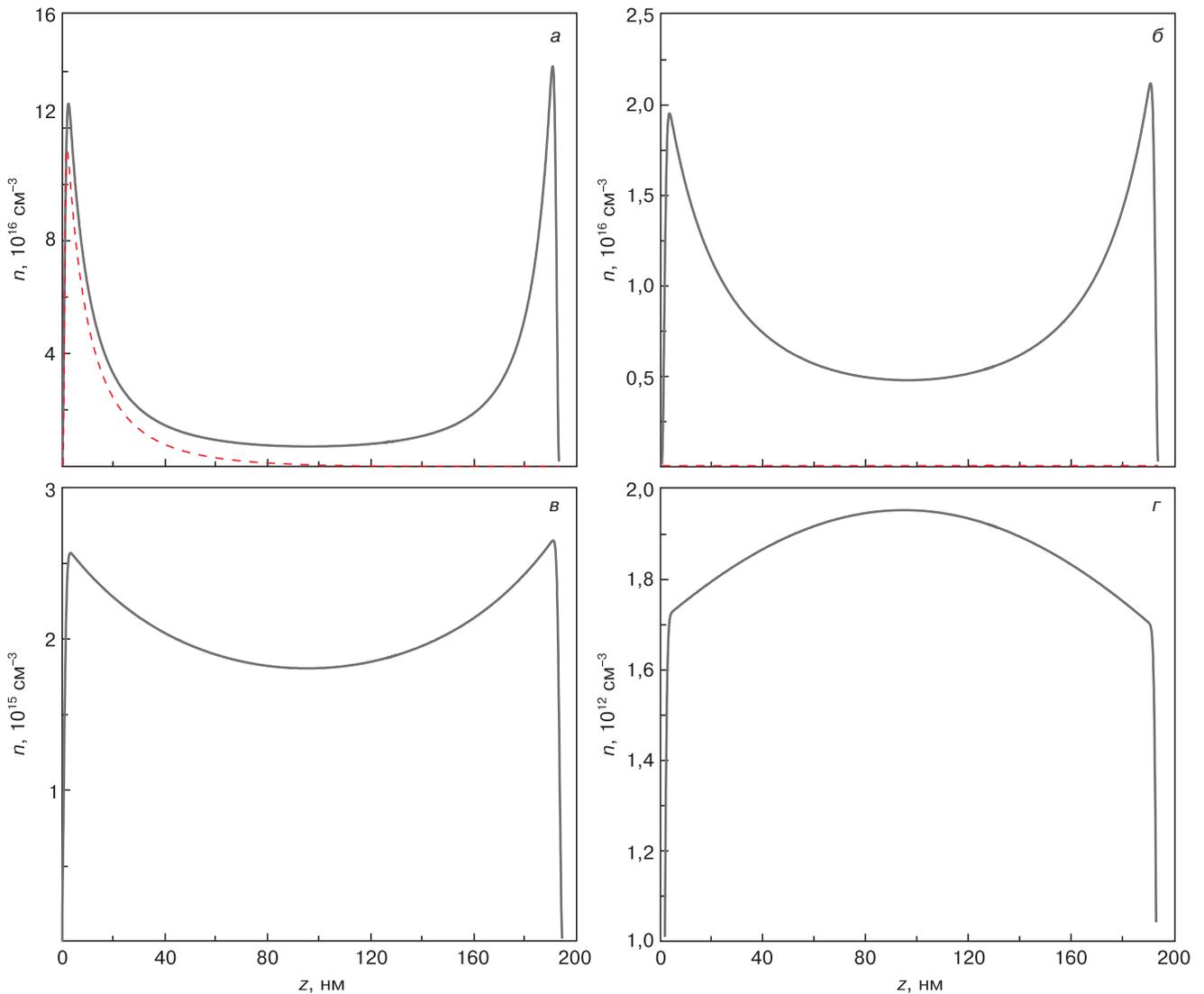


Рис. 4. Распределения электронной плотности по толщине проводящего канала в различных продольных сечениях: а —  $U = 5$  В; б — 2,5 В; в — 1,5 В; г — 1 В

Fig. 4. Distribution of electron density over the thickness of the conducting channel in different longitudinal sections: (a)  $U = 5$  V, (б) 2.5, (в) 1.5, (г) 1

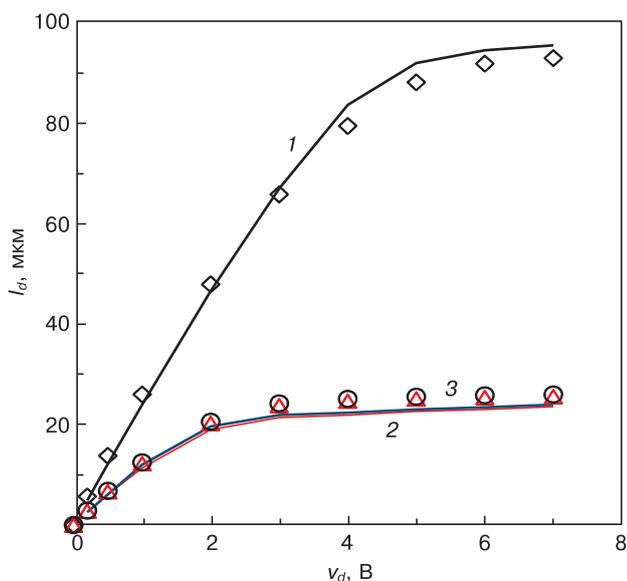


Рис. 5. Расчетные (сплошные кривые) и экспериментальные (маркеры) для трех вариантов напряжения на затворах: 1 — потенциалы на обоих затворах равны 5 В; 2 — потенциал на верхнем затворе — 5 В, на нижнем — 0; 3 — потенциал на верхнем затворе равен нулю, на нижнем — 5 В

Fig. 5. Calculated (solid curves) and experimental (markers) for three voltage options at the gates: (1) potentials at both gates are 5 V; (2) potential at the upper gate 5 V, at the lower 0; (3) the potential at the upper gate is zero, at the lower gate 5 V

### Заклучение

Рассмотрены вопросы численного моделирования полевых датчиков Холла на основе структуры «кремний на изоляторе» с двумя управляющими затворами. Апробирована локально-одномерная вычислительная модель, согласно которой продольное распределение слоевой концентрации электронов в проводящем канале определяется в результате решения серии одномерных уравнений Шредингера—Пуассона с различными граничными условиями, после чего осуществляется расчет токовых характеристик элемента. Проведенные вычислительные эксперименты показали, что результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными для ПДХ. Разработанная компьютерная модель позволяет оперативно проводить многовариантный анализ различных структур ПДХ, что создает основу для оптимизации устройств рассматриваемого класса.

### Библиографический список

1. Мордкович В. Н. Датчики на основе структур «кремний на изоляторе» // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 2008. Вып. 2. С. 34—44.

2. Popovich R. S. Hall Effect Devices. Bristol (Philadelphia): IOP Publishing Ltd, 2004. 419 p.

3. 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.

4. 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.

5. Королев М. А., Павлюк М. И., Девликанова С. С. Физическая модель полевого датчика Холла на основе КНИ структуры // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2017. № 2. С. 166—170. DOI: 10.24151/1561-5405-2017-22-2-166-170

6. 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. Т. 45, Вып. 6. С. 754—758.

7. Мордкович В. Н., Пажин Д. М., Громов Д. В., Скоробогатов П. К., Релаксационные эффекты в полевых датчиках Холла при воздействии импульса ионизирующего облучения // Электронная техника. Серия 2: Полупроводниковые приборы. 2011. № 1. С. 19—26.

8. 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. Т. 7, № 3. С. 91—95.

9. 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 ЖТФ. 2016. Т. 42, Вып. 2. С. 30—36. URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/42789>

10. 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 // Proc. Engineering. 2015. V. 120. P. 1197—1200. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.786

11. Абгарян К. К., Ревизников Д. Л. Вычислительные алгоритмы в задачах моделирования и оптимизации полупроводниковых гетероструктур. М.: МАКС Пресс, 2016. 120 с.

12. Абгарян К. К., Ревизников Д. Л. Численное моделирование распределения носителей заряда в наноразмерных полупроводниковых гетероструктурах с учетом поляризационных эффектов // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2016. Т. 56, № 1. С. 155—166. DOI: 10.7868/S004446691601004X

13. Abgaryan K. K., Mutigullin I. V., Reviznikov D. L. Computational model of 2DEG mobility in the AlGaIn/GaN heterostructures // Phys. Status Solidi (c). 2015. V. 12, N. 4–5. P. 460—465. DOI: 10.1002/pssc.201400200

14. 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 // Phys. Status Solidi (c). 2015. V. 12, N. 12. P. 1376—1382. DOI: 10.1002/pssc.201510159

15. Vasilevska D., Goodnick S. M., Goodnick S. Computational Electronics: Semiclassical and Quantum Device Modeling and Simulation, CRC Press, 2010.

16. Stengel F., Noor Mohammad S., Morkoç H. Theoretical investigation of electrical characteristics of AlGaIn/GaN modulation doped field-effect transistors // J. Appl. Phys. 1996. V. 80, Iss. 5. P. 3031—3042. DOI: 10.1063/1.363162

17. 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. Т. 49, Вып. 10. С. 1360—1365. URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/42306>

18. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984. Т. 2. 453 с.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19–08–01191.

Статья поступила в редакцию 13 июля 2020 г.

## Simulation of Hall field elements based on nanoscale silicon–on–insulator heterostructures

V. N. Mordkovich<sup>1</sup>, K. K. Abgaryan<sup>2,3,§</sup>, D. L. Reviznikov<sup>2,3</sup>, A. V. Leonov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Institute of Microelectronics Technology and High–Purity Materials of the Russian Academy of Sciences, 6 Academician Ossipyan Str., Chernogolovka, Moscow Region, 142432, Russia*

<sup>2</sup> *Dorodnicyn Computing Centre of the Russian Academy of Sciences, 44 Vavilov Str., Moscow 119333, Russia*

<sup>3</sup> *Moscow Aviation Institute (National Research University), 4 Volokolamskoe shosse, 4, Moscow 125993, Russia*

**Abstract.** The article is devoted to the issues of numerical simulation of field Hall sensors based on the “silicon on insulator” structure with two control gates. To solve the problem, a two–level local–one–dimensional computational model is used. At the first level, a series of one–dimensional Schrödinger–Poisson equations are solved, which describe the distribution of the electron density across the heterostructure in different sections. The obtained information is transmitted to the second level, where the current characteristics of the element are calculated. The numerical simulation results are compared with the experimental data obtained for field Hall sensors. Comparative analysis shows good agreement between calculated and experimental data. The developed computer model makes it possible to carry out a multivariate analysis of various heterostructures, which creates the basis for optimizing devices of the class under consideration.

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

### References

1. Mordkovich V. N. Sensors based on silicon–on–insulator structures. *Elektronnaya tekhnika. Series. 2. Poluprovodnikovye pribory = Electronic engineering. Ser. 2. Semiconductor devices*, 2008, no. 2, pp. 34–44. (In Russ.)
2. Popovich R. S. Hall Effect Devices. Bristol (Philadelphia): IOP Publishing Ltd, 2004. 419 p.
3. 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, pp. 455–459.
4. Mordkovich V. N., Baranochnikov M. L., Leonov A. V., Mokrushin A. D., Omelianovskaya N. M., Pazhin D. M. Field Hall device – a new type of magnetic field transducer. *Datchiki i sistemy = Sensors and Systems*, 2003, no. 7, pp. 33–38. (In Russ.)
5. Korolev M. A., Pavlyuk M. I., Devlikanova S. S. Physical model of SOI field–effect Hall sensor. *Izvestiya vuzov. Elektronika = Proceedings of universities. Electronics*, 2017, no. 2, pp. 166–170. (In Russ.). DOI: 10.24151/1561-5405-2017-22-2-166-170
6. 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, vol. 45, no. 6, pp. 738–742. DOI: 10.1134/S1063782611060224
7. Mordkovich V. N., Pazhin D. M., Gromov D. V., Skorobogatov P. K. Relaxation effects in field Hall sensors influence of impulse ionizing irradiation. *Elektronnaya tekhnika. Series. 2. Poluprovodnikovye pribory = Electronic engineering. Ser. 2. Semiconductor devices*, 2011, no. 1, pp. 19–26. (In Russ.)
8. 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, vol. 7, no. 3, pp. 91–95. (In Russ.)
9. Leonov A. V., Malykh A. A., Mordkovich V. N., Pavlyuk M. I. A magnetosensitive thin–film silicon Hall–type field–effect tran-

sistor with operating temperature range expanded up to 350 °C. *Tech. Phys. Lett.*, 2016, vol. 42, no. 1, pp. 71–74. DOI: 10.1134/S1063785016010272

10. 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. *Proc. Engineering*, 2015, vol. 120, pp. 1197–1200. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.786

11. Abgaryan K. K., Reviznikov D. L. *Vychislitel'nye algoritmy v zadachakh modelirovaniya i optimizatsii poluprovodnikovykh geterostruktur* [Computational algorithms in problems of modeling and optimization of semiconductor heterostructures]. Moscow: MAKS Press, 2016, 120 p. (In Russ.)

12. Abgaryan K. K., Reviznikov D. L. Numerical simulation of the distribution of charge carrier in nanosized semiconductor heterostructures with account for polarization effects. *Comput. Math. and Math. Phys.*, 2016, vol. 56, pp. 161–172. DOI: 10.1134/S0965542516010048

13. Abgaryan K. K., Mutigullin I. V., Reviznikov D. L. Computational model of 2DEG mobility in the AlGaIn/GaN heterostructures. *Phys. Status Solidi (c)*, 2015, vol. 12, no. 4–5, pp. 460–465. DOI: 10.1002/pssc.201400200

14. Abgaryan K. K., Mutigullin I. V., Reviznikov D. L. Theoretical investigation of 2DEG concentration and mobility in the Al–GaIn/GaN heterostructures with various Al concentrations. *Phys. Status Solidi (c)*, 2015, vol. 12, no. 12, pp. 1376–1382. DOI: 10.1002/pssc.201510159

15. Vasileksa D., Goodnick S. M., Goodnick S. *Computational Electronics: Semiclassical and Quantum Device Modeling and Simulation*, CRC Press, 2010.

16. Stengel F., Noor Mohammad S., Morkoç H. Theoretical investigation of electrical characteristics of AlGaIn/GaN modulation doped field–effect transistors. *J. Appl. Phys.*, 1996, vol. 80, no. 5, pp. 3031–3042. DOI: 10.1063/1.363162

17. Naumova O. V., Zaitseva E. G., Fomin B. I., Ilnitsky M. A., Popov V. P. Density dependence of electron mobility in the accumulation mode for fully depleted SOI films. *Semiconductors*, 2015, vol. 49, no. 10, pp. 1316–1322. DOI: 10.1134/S1063782615100017

18. Sze S. M. *Physics of Semiconductor Devices*. Wiley–Interscience, 1981, 880 p.

**Acknowledgment.** This work was supported by the RFBR grant No. 19–08–01191.

### Information about authors:

**Victor N. Mordkovich**<sup>1</sup>: Dr. Sci. (Phys.–Math.), Chief Researcher; **Karine K. Abgaryan**<sup>2,3,§</sup>: Dr. Sci. (Phys.–Math.), Head of the Department (kristal83@mail.ru); **Dmitry L. Reviznikov**<sup>2,3</sup>: Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor (reviznikov@gmail.com); **Alexey V. Leonov**<sup>1</sup>: Cand. Sci. (Phys.–Math.), Researcher

§ Corresponding author