

УДК 537.311.5

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ АКТИВНЫХ УСТРОЙСТВ ФЕРРОМАГНЕТИК/КРЕМНИЙ И ИХ ТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА

© 2021 г. А. В. Лукьяненко^{a, b}, А. С. Тарасов^{a, b}, Л. В. Шанидзе^{a, b}, М. Н. Волочаев^a, Ф. В. Зеленов^b, И. А. Яковлев^a, И. А. Бондарев^{a, b, *}, Н. В. Волков^{a, b}

^aИнститут физики им. Л.В. Киренского, Федеральный исследовательский центр КНЦ СО РАН, Красноярск, 660036 Россия

^bИнститут инженерной физики и радиоэлектроники, Сибирский федеральный университет, Красноярск, 660041 Россия

*e-mail: bia@iph.krasn.ru

Поступила в редакцию 09.02.2020 г.

После доработки 14.03.2020 г.

Принята к публикации 17.03.2020 г.

Полупроводниковые нанопроволоки представляют собой уникальные материалы для изучения явлений на наноуровне, а возможность формирования кремниевых нанонитей в нисходящем процессе с использованием объемных подложек кремния-на-изоляторе (КНИ) дает этой технологии возможность полного внедрения в интегрированные электронные системы. Помимо всего прочего, использование ферромагнитных контактов в сочетании с хорошим качеством границ ферромагнетик–полупроводник открывают перспективы применения таких структур для использования в устройствах спинтроники, в частности при проектировании спинового транзистора. Продемонстрирован простой подход к созданию активных устройств на основе полупроводниковых нанопроволок, а именно полевых транзисторов Шоттки с нижним затвором и металлическим (Fe) истоком и стоком, синтезированных на подложке КНИ, а также получены их транспортные характеристики.

Ключевые слова: кремний-на-изоляторе, транзистор, барьер Шоттки, электронная литография, нанопроволока, реактивно-ионное травление, электронный транспорт.

DOI: 10.31857/S1028096021010106

ВВЕДЕНИЕ

Полевые транзисторы на основе кремниевых нанопроволок находят все большее применение не только в области фундаментальных исследований физических процессов, но и в качестве высокочувствительных сенсоров для детектирования широкого спектра молекул. Датчики на основе МОП-структур (МОП – металл–оксид–полупроводник) наиболее широко распространены как коммерческие, но рассматриваемые в настоящей работе датчики типа полевых транзисторов имеют больше преимуществ по сравнению с традиционными, благодаря их уменьшенной форме, размеру и более низкой себестоимости. Кремниевые нанопроволоки обладают уникальными свойствами, такими как собственные малые диаметры и квазиоднородный перенос тока [1]. Кроме того, высокое отношение площади поверхности к объему нанопроволоки делает их электронные свойства чувствительными к заряду на поверхности и у поверхности. Поэтому нанопроволоки имеют

большие перспективы для приложений, начиная от газовых сенсоров до нанобиоэлектроники [2, 3].

Для формирования наноразмерного проводящего токового канала существуют два подхода: “снизу–вверх” и “сверху–вниз”. Подход “снизу–вверх” подразумевает использование процессов самосборки [4]. В ряде экспериментальных работ [5, 6] приборы на основе кремниевых нанопроволок были изготовлены с использованием подхода “снизу–вверх”. При таком подходе часто возникают трудности контроля процесса легирования и формирования контактов, в то время как приборы на основе кремниевых нанопроволок, изготовленные с использованием подхода “сверху–вниз”, показывают лучший контроль и воспроизводимость этих параметров. В рамках простой интеграции и возможности последующего внедрения наиболее перспективным выглядит использование подхода “сверху–вниз” с применением существующих кремниевых технологий.

На данный момент основное внимание уделяется традиционным структурам полевого транзи-

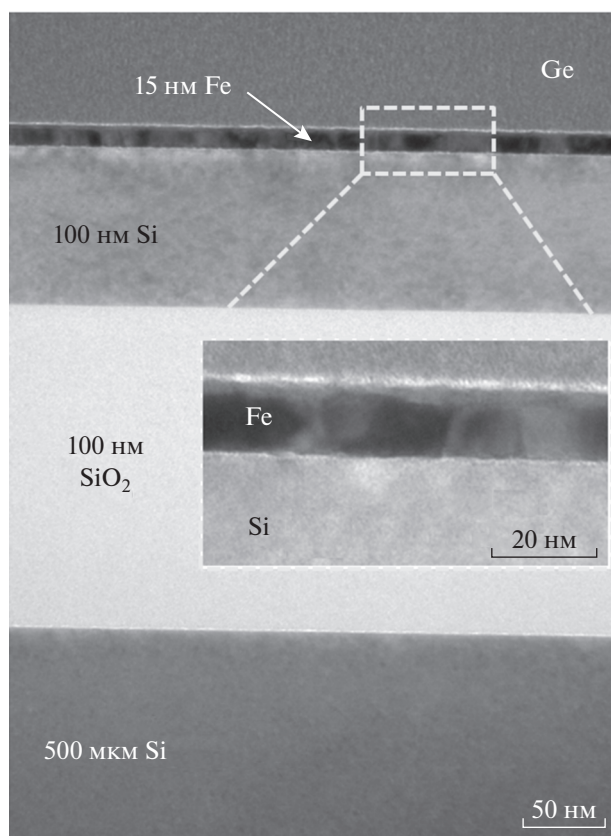


Рис. 1. ПЭМ-изображение поперечного среза структуры Fe/КНИ с обозначением материала слоев и толщин.

стора с *n-p-n*-легированием, что требует сложных технологических этапов легирования [7, 8]. Полевые транзисторы с барьером Шоттки обладают рядом преимуществ, включая простой и низкотемпературный процесс изготовления, а также исключается необходимость легирования и последующих этапов активации [9]. Такой подход к геометрии устройства позволяет заменить переходы источник–сток на переходы металл–полупроводник, оставляя нанопроволоку нелегированной [10]. Эти особенности особенно желательны для нанопроволочных устройств, поскольку они позволяют обойти сложные проблемы изготовления, такие как точное управление типом и уровнем легирования, а также формирование надежных омических контактов.

Геометрия нанопроволочного транзистора с нижним затвором хорошо подходит для использования его в качестве высокочувствительного сенсора, так как токовый канал остается открытым для реализации химического зондирования широкого спектра соединений. В рамках настоящей работы показано, что нанопроволоки с контактами Шоттки могут использоваться в качестве полевых транзисторов и стать основой для высокочувствительных электрических датчиков или

служить базой для проектирования спинового транзистора. Возможность формирования кремниевых нанопроволок в нисходящем процессе с использованием объемных подложек из кремния-на-изоляторе (КНИ) дает возможность полной интеграции в электронные системы [11].

МЕТОДИКА

Для последующего литографического процесса на подложке КНИ была выращена пленка Fe методом термического испарения в сверхвысоком вакууме. Для синтеза использовали коммерчески доступные, легированные бором пластины КНИ (SIMOX SOI) с удельным сопротивлением $18 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ (допирование 10^{15} см^{-3}) с толщиной приборного слоя кремния 100 нм ориентации (100) и захороненного оксида 200 нм. Перед загрузкой в ростовую камеру подложки были химически очищены с помощью метода [12]. До начала процесса осаждения железа для удаления естественного оксида с поверхности кремния пластины отжигали в сверхвысоком вакууме (10^{-8} Па) при температуре 400°C в течение 30 мин. На рис. 1 показаны изображения просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) поперечного среза синтезированной структуры, полученные с помощью микроскопа HT-7700 (Hitachi). Структура содержит следующие слои: Fe толщиной 15 нм, Si – 100 нм, SiO_2 – 200 нм, Si – 500 мкм. Из рис. 1 следует, что пленка железа состоит из крупных кристаллитов размером около 20–30 нм, а также наблюдается ровная и резкая граница раздела между Fe и Si.

Топологию верхнего слоя кремния и железа формировали методом электронной литографии на установке Voyager (Raith) и жидкого и сухого травления. Анизотропное реактивно-ионное травление осуществляли при помощи фторной плазмы, генерируемой системой RIE-1701 (Nordson MARCH) из газа CF_4 . По окончании технологического процесса готовые устройства исследовали методами атомно-силовой (АСМ) и растровой электронной микроскопии (РЭМ) (микроскоп TM-3000, Hitachi). Одновременно проводили элементный анализ методом энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС). Транспортные свойства активных устройств исследовали в криогенной зондовой станции EMPX-HF 2 (Lakeshore) при температурах от 4.2 до 300 К с помощью двухканального источника-измерителя SourceMeter 2634b (Keithley) на постоянном токе и LCR-метра E4980A (Agilent) на переменном токе в частотном диапазоне от 20 Гц до 2 МГц. Дополнительные измерения проводимости осуществляли на оригинальной установке с использованием приборов SourceMeter 2430 (Keithley) и Model 6517B (Keithley) [13–15].

Устройства изготавливали в несколько этапов, основные отражены на рис. 2а. С помощью специа-

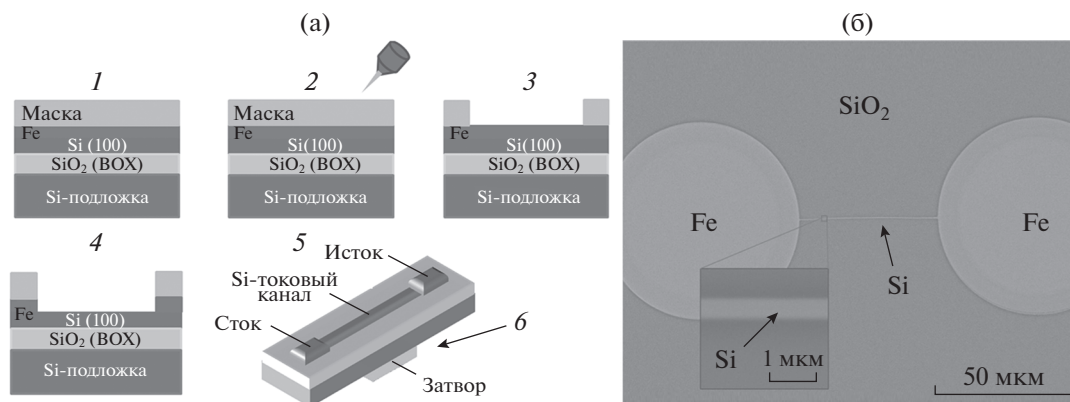


Рис. 2. Схема изготовления нанопроволочного устройства (а): нанесение резиста (1); экспонирование электронным лучом согласно шаблону (2); проявление резиста (3); жидкое химическое травление Fe в растворе соляной кислоты (4); реактивное ионное травление Si (5); формирование электрода затвора (6). РЭМ-изображение в режиме ЭДС (б).

лизированного программного обеспечения был разработан шаблон, задающий форму устройств. Он представлял собой набор изображений, содержащий прямоугольники и круги, которые выполняли роль контактных площадок, и перемычки между ними, задающие кремниевый токовый канал. Ширина канала в пределах ряда варьировалась от 300 нм до 3 мкм, а длина 48 мкм была постоянной. Далее на поверхность структуры Fe/КНИ наносили негативный электронный резист марки AZ 2035 nLoF толщиной 300 нм методом центрифугирования с последующей обработкой при 112°C в течение 1.5 мин. После образец экспонировали электронным лучом согласно заданному шаблону, проводили еще одну обработку резиста при температуре 112°C в течение 1.5 мин и смывали незащеченные участки в проявителе ПП-051МС. В результате была сформирована химически и механически стойкая маска. Далее образец был обработан в водном растворе соляной кислоты для травления пленки Fe. На данном этапе образец специально передерживали в растворе, чтобы добиться изотропного проникновения кислоты под маску на глубину около 1 мкм. Такой способ позволил растворить железо в области перемычки и в то же время сохранить его на контактных площадках. Время выдержки составило 50 с при концентрации водного раствора соляной кислоты 5%. Затем при использовании той же маски было проведено сухое реактивно-ионное травление для удаления кремниевого слоя. В результате описанного технологического процесса был получен массив кремниевых нанопроволок с металлическими контактными площадками из пленки железа. Были сформированы два контакта устройства. Третий контакт был изготовлен при помощи нанесения индия на нижнюю сторону подложки КНИ.

РЭМ-изображение одного готового устройства в режиме ЭДС показано на рис. 2б, на кото-

ром видны железо на контактах сток—исток, кремниевая перемычка, являющаяся токовым каналом транзистора, и оксид кремния, открывшийся на подложке после сухого ионно-плазменного травления. Также из этих данных можно оценить толщину провода, она составляет около 400 нм. Более детально размеры определены и сопоставлены с шаблоном с помощью АСМ. Установлено, что ширина провода отклоняется от маски не более чем на 5%, а высота остается неизменной и составляет 100 нм, что соответствует начальной толщине кремниевого слоя. Это свидетельствует о том, что маска полностью защищает элементы устройства на втором этапе травления.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

После процесса изготовления были проведены исследования электронных транспортных свойств нанопроволочных устройств. На рис. 3а, 3б показаны трансферные и вольтамперные характеристики (ВАХ) для устройства с шириной токового канала 400 нм. При развертке напряжения на затворе V_{GD} происходит резкий рост тока в канале I_{SD} , т.е. наблюдается открытие транзистора. Максимальное отношение тока “включенного” и “выключенного” транзистора составляет пять порядков. Устройство демонстрирует амбиполярные характеристики, т.е. практически не зависит от полярности затвора. Это свидетельствует в пользу того, что реализуется и *n*-, и *p*-тип проводимости. При отрицательном V_{GD} происходит аккумуляция дырок, а при положительном V_{GD} включается режим инверсии, что также было подтверждено с помощью вольт-фарадных характеристик сток—затвор. Поскольку контакты стока и истока сформированы из железа непосредственно на кремнии с концентрацией примесей 10^{15} см^{-3} , на границе раздела металл—полупроводник должен образо-

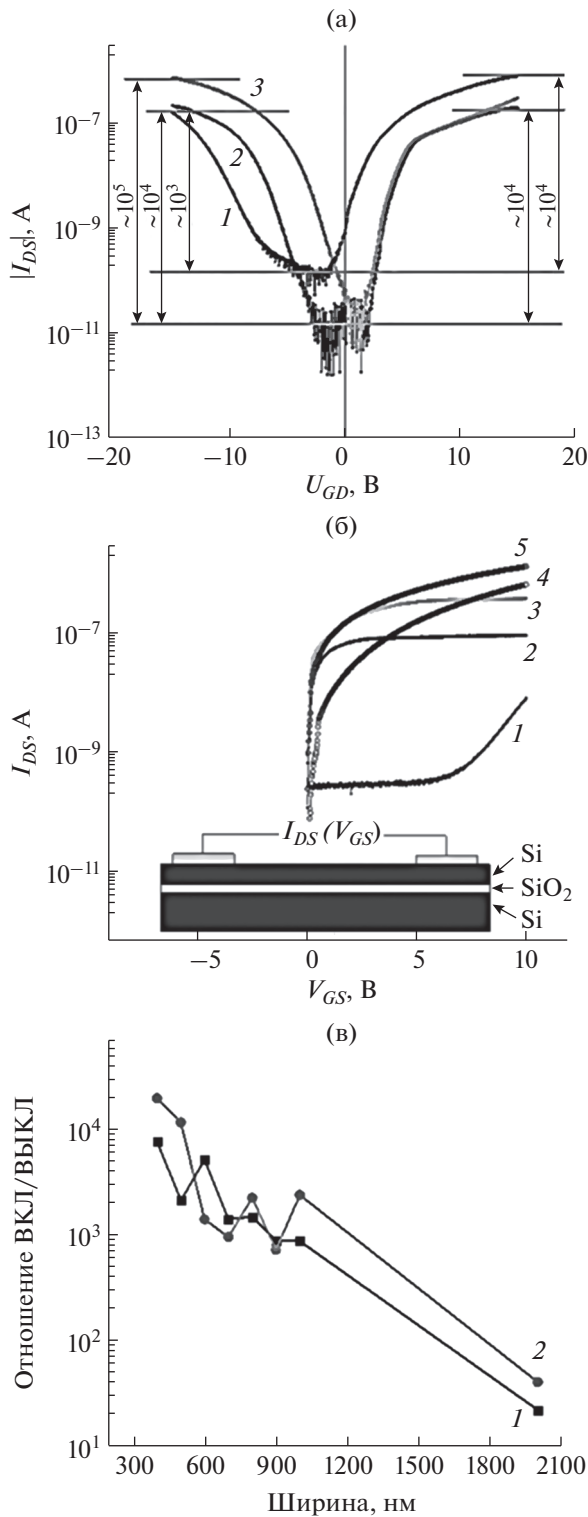


Рис. 3. Зависимость тока сток–исток (а) при 300 К и ширине транспортного канала 400 нм от напряжения на нижнем затворе при различных смещениях на стоке: -5 (1); 3 (2); 7 В (3). Вольт-амперные характеристики сток–исток (б) при различных смещениях на затворе: 0 (1); 10 (2); 15 (3); -10 (4); -15 В (5). Зависимость отношения токов “включенного” и “выключенного” транзистора от ширины канала при “включенном” напряжении: +15 В (1); -15 В (2).

ываться барьер Шоттки. Действительно, при нулевом напряжении на затворе ток в канале транзистора очень низкий, менее 10^{-10} А. Это обусловлено тем, что сток и исток, по сути, представляют собой два диода Шоттки, включенных навстречу друг другу, ток через такую конструкцию определяется обратной ветвью ВАХ диода. Кроме того, как видно из рис. 3б, при $|V_{GD}| > 0$ ВАХ сток–исток, во-первых, нелинейны, а во-вторых, отличаются для положительных и отрицательных V_{GD} .

Рассмотрим процессы, происходящие в устройстве. При развертке отрицательного V_{GD} в канале происходит аккумуляция основных носителей (дырки), вследствие чего барьер Шоттки для дырок существенно сужается, одновременно снижаясь за счет напряжения V_{GD} . В результате к току через тонкий и узкий барьер Шоттки, формирующийся за счет термоэлектронной эмиссии, добавляется туннельный ток. При отрицательном напряжении на затворе реализуется режим инверсии, т.е. генерируются неосновные носители (электроны). В этом случае все вышеизложенные рассуждения будут верны, за исключением того, что проводящий канал будут формировать электроны. Разница в ВАХ сток–исток для разной полярности V_{GD} обусловлена тем, что в режиме инверсии ток выходит на насыщение вследствие ограниченной скорости генерации неосновных носителей, которыми в допированного бором Si являются электроны. В то же время при обратном смещении V_{GD} в режиме аккумуляции дырочный ток должен неограниченно возрастать как в случае термоэлектронной эмиссии, так и при квантово-механическом туннелировании через барьер Шоттки, что и наблюдается в эксперименте.

Как было указано выше, были изготовлены устройства с шириной нанопроволоки от 300 нм до 3 мкм, и для всех были измерены транспортные характеристики. Все особенности транспортных и вольт-амперных кривых, наблюдающиеся и описанные для проволоки шириной 400 нм, повторяются и для более крупных устройств. Отсюда можно предположить, что основные транспортные процессы не зависят от ширины канала транзистора. Однако при анализе зависимости отношения тока “включенного” и “выключенного” транзистора от ширины проволоки обнаруживается, что наименьшее устройство демонстрирует наилучшие показатели (рис. 3в). Это, в первую очередь, связано со значительным снижением тока сток–исток в узком канале при нулевом смещении на затворе. В то же время при $|V_{GD}| = 15$ В ток сток–исток для всего ряда устройств различается лишь на порядок. Другими словами, плотность тока практически не зависит от площади сечения канала в состоянии “включено”, что ожидаемо. Снижение тока утечки в состоянии “выключено” непропорционально уменьше-

нию геометрических размеров транзистора может быть обусловлено наличием дефектов вблизи границы раздела металл–полупроводник. Такие дефекты образуют локализованные энергетические состояния в запрещенной зоне кремния, туннельный транспорт через которые увеличивает обратный ток через барьер Шоттки. Неравномерное распределение дефектов может привести к нелинейной зависимости их концентрации от площади контакта металл–полупроводник, а, следовательно, и плотности тока утечки. Для более конкретных выводов требуются дальнейшие исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предложен простой технологический процесс изготовления трехтерминальных устройств, представляющих собой нанопроволочный транзистор с нижним затвором. Подход включает в себя однослойную электронную литографию, жидкостное и сухое травление. Структурная характеристика показала хорошую точность, повторяемость и масштабируемость разработанного метода. Посредством исследования электронных транспортных свойств установлено, что в устройстве реализуется и *n*-, и *p*-тип проводимости. При отрицательном V_{GD} происходит аккумуляция дырок, а при положительном V_{GD} включается режим инверсии. Показано, что на контактах стока и истока образуется барьер Шоттки, в результате транзистор оказывается нормально закрытым. Все особенности трансферных и вольт-амперных кривых повторяются для всех изготовленных устройств. Максимальное отношение тока “включенного” и “выключенного” транзистора, составляющее пять порядков, наблюдается для транзистора с шириной токового канала 400 нм. Это, в первую очередь, связано с низким током утечки в узком канале при нулевом смещении на затворе. Надеемся, что предложенная технология будет полезна для развития и создания новых электронных устройств. Кремниевые нанопроволоки имеют малый размер, сопоставимый с размером молекул, и высокое отношение площади поверхности к объему. Эти преимущества в сочетании с недорогим процессом изготовления позволяют использовать транзисторы на основе нанопроволок в качестве сверхчувствительных электронных датчиков. Когда дело доходит до сенсорных устройств, небольшое напряжение позволит эффективно контролировать потенциал нанопроволоки даже при очень малом входном сигнале, что делает это устройство очень чувствительным, особенно для химического зондирования и биосенсорики.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследования выполнены с использованием оборудования Красноярского регионального центра коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, Президиума РАН (Программа № 32 “Наноструктуры: Физика, Химия, Биология, Основы Технологий”), а также РФФИ, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки (проект № 18-42-243022).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Riel H., Wernersson L.-E., Hong M., del Alamo J.A. // MRS Bull. 2014. V. 39. Iss. 8. P. 668. <https://doi.org/10.1557/mrs.2014.137>
2. Huang X.J., Choi Y.K. // Sensors Actuators. B. 2007. V. 122. № 2. P. 659. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2006.06.022>
3. Noy A. // Adv. Mater. 2011. V. 23. № 7. P. 807. <https://doi.org/10.1002/adma.201003751>
4. Wang H., Zepeda-Ruiz L.A., Gilmer G.H., Upmanyu M. // Nature Commun. 2013. V. 4. P. 1956. <https://doi.org/10.1038/ncomms2956>
5. Cui Y., Zhong Z., Wang D. et al. // Nano Lett. 2003. V. 3. № 2. P. 149. <https://doi.org/10.1021/nl0258751>
6. Cui H., Cruz-Correa M., Giardiello F.M. et al. // Science. 2003. V. 299. № 5613. P. 1753. <https://doi.org/10.1126/science.1080313>
7. Allibert F., Ernst T., Pretet J. et al. // Solid-State Electron. 2001. V. 45. № 4. P. 559. [https://doi.org/10.1016/S0038-1101\(01\)00074-0](https://doi.org/10.1016/S0038-1101(01)00074-0)
8. Hu S.-F., Wu Y.-C., Sung C.-L. et al. // IEEE Transac. Nanotechnol. 2004. V. 3. № 1. P. 93. <https://doi.org/10.1109/TNANO.2003.820784>
9. Koo S.M., Edelstein M.D., Li Q et al. // Nanotechnol. 2005. V. 16. № 9. P. 1482. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/16/9/011>
10. Mikolajick T., Heinzig A., Trommer J. // Phys. Stat. Sol. (RRL). 2013. V. 7. № 10. P. 793. <https://doi.org/10.1002/pssr.201307247>
11. Colinge J.P., Lee C.W., Afzalilian A. et al. // Nature Nanotechnol. 2010. V. 5. № 3. P. 225. <https://doi.org/10.1038/nnano.2010.15>
12. Yakovlev I.A., Varnakov S.N., Belyaev B.A. et al. // JETP Lett. 2014. V. 99. № 9. P. 527. <https://doi.org/10.1134/S0021364014090124>
13. Volkov N.V., Tarasov A.S., Smolyakov D.A. et al. // AIP Adv. 2017. V. 7. № 1. P. 015206. <https://doi.org/10.1063/1.4974876>
14. Tarasov A.S., Rautskii M.V., Lukyanenko A.V. et al. // J. Alloys Compd. 2016. V. 688. P. 1095. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.07.138>
15. Tarasov A.S., Lukyanenko A.V., Rautskii M.V. et al. // Semicond. Sci. Technol. 2019. V. 34. № 3. P. 035024. <https://doi.org/10.1088/1361-6641/ab0327>

Technological Process for Fabrication of Active Ferromagnetic/Silicon Devices and Their Transport Properties

A. V. Lukyanenko^{1,2}, A. S. Tarasov^{1,2}, L. V. Shanidze^{1,2}, M. N. Volochaev¹, F. V. Zelenov²,
I. A. Yakovlev¹, I. A. Bondarev^{1,2,*}, N. V. Volkov^{1,2}

¹*Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center KSC, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, 660036 Russia*

²*Institute of Engineering Physics and Radio Electronics, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 660041 Russia*
**e-mail: bia@iph.krasn.ru*

Semiconductor nanowires represent unique materials for studying nanoscale phenomena, and the possibility of forming silicon nanowires in a downstream process using bulk silicon on insulator (SOI) substrates allows this technology to be fully integrated into electronic systems. Among other things, the use of ferromagnetic contacts in combination with the good quality of the ferromagnetic–semiconductor interfaces open up prospects for the use of such structures in spintronics devices, in particular, in designing a spin transistor. A simple approach to creating active devices based on semiconductor nanowires, namely, Schottky field-effect transistors with a lower gate and a metal (Fe) source and drain, synthesized on a SOI substrate, is demonstrated, and their transport characteristics are obtained.

Keywords: silicon on insulator, transistor, Shottky barrier, electronic lithography, nanowire, reactive ion etching, electronic transport.