

07.4

Эффект спиновой аккумуляции в эпитаксиальной структуре $\text{Fe}_3\text{Si}/n\text{-Si}$ и влияние на него электрического смещения

© А.С. Тарасов^{1,2}, А.В. Лукьяненко^{1,2}, И.А. Бондарев^{1,2}, И.А. Яковлев¹, С.Н. Варнаков¹, С.Г. Овчинников^{1,2}, Н.В. Волков^{1,2}

¹ Институт физики им. Л.В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

² Институт инженерной физики и радиоэлектроники Сибирского федерального университета, Красноярск, Россия

E-mail: taras@iph.krasn.ru

Поступило в Редакцию 8 ноября 2019 г.

В окончательной редакции 19 февраля 2020 г.

Принято к публикации 6 апреля 2020 г.

Продemonстрирована электрическая инжекция спин-поляризованного тока в кремний в эпитаксиальной структуре $\text{Fe}_3\text{Si}/n\text{-Si}$. Эффект спиновой аккумуляции исследовался при помощи измерения локального и нелокального напряжения в специально подготовленном четырехтерминальном устройстве. Обнаруженный эффект влияния электрического смещения на спиновый сигнал обсуждается и сравнивается с другими результатами, полученными для структур ферромагнетик/полупроводник.

Ключевые слова: силицид железа, структуры ферромагнетик/полупроводник, эффект Ханле, спиновая аккумуляция, электрическая спиновая инжекция.

DOI: 10.21883/PJTF.2020.13.49591.18106

Исследования спин- и магнито­зависимого транспорта в различных наноструктурах ведутся уже многие десятилетия. Бурное развитие этой области началось с открытия эффекта гигантского магнитосопротивления [1], а предложенный авторами работы [2] вариант спинового транзистора подтолкнул исследователей к поиску и созданию различных спиновых приборов [3]. В отличие от традиционной электроники, эксплуатирующей заряд электрона, спинтроника старается оперировать спином и спиновым током [4]. Наиболее многообещающей представляется кремниевая спинтроника, она изучает спиновые явления в структурах и устройствах, изготовленных на основе кремния. Такой подход позволит на основе высокоразвитой кремниевой технологии создать новые спиновые устройства. Более того, в ближайшей перспективе он позволит разработать гибридные устройства, сочетающие в себе элементы классической электроники и спинтроники, как это уже произошло с магнитной оперативной памятью [5]. Помимо технологической привлекательности кремний также обладает слабым спин-орбитальным взаимодействием, что необходимо для реализации спинового транспорта на больших расстояниях. Следовательно, именно Si может стать той базой, на которой может быть построена электроника нового поколения и ее основной элемент — спиновый транзистор (SpinFET). Для работы SpinFET и некоторых других спиновых устройств необходимо создавать спиновую аккумуляцию в немагнитном кремнии и каким-то образом ее детектировать. Наиболее простой и подходящий для электроники способ — электрическая спиновая инжекция и детектирование [6]. Чтобы экспериментально обнаружить эффект спиновой аккумуляции, т. е. детектировать неравновесную спиновую поляризацию, созданную

электрической инжекцией, применяют так называемые нелокальные измерения спинового транспорта (nonlocal spin transport measurements (4T)) [7] или трехтерминальный метод Ханле (3T) [8]. Эти подходы повсеместно применяются для изучения особенностей спинового транспорта в кремниевых структурах, поиска наиболее эффективных материалов инжектора и совершенствования теории спиновой диффузии [9,10]. Все еще продолжается поиск оптимальных материалов, состава слоев и топологии различных спиновых устройств. В настоящей работе в устройстве на основе эпитаксиальной структуры $\text{Fe}_3\text{Si}/n\text{-Si}$ продемонстрирован эффект спиновой аккумуляции и исследовано влияние на него электрического смещения. Использование низкодopированной подложки ($n = 2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) для изготовления структуры, а также отсутствие туннельной диэлектрической прослойки в нашей структуре не мешало электрической спиновой инжекции в кремний.

Пленка ферромагнитного силицида железа Fe_3Si была выращена на допированной фосфором кремниевой подложке $n\text{-Si}$ с ориентацией (111) и удельным сопротивлением $\rho = 2 \Omega \cdot \text{cm}$ ($n = 2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) при 200°C методом молекулярно-лучевой эпитаксии в условиях сверхвысокого вакуума. Ростовая камера была оснащена системой дифракции отраженных быстрых электронов (ДОБЭ) и эллисометром, позволяющими контролировать процесс роста *in situ*. Картина ДОБЭ, полученная после одновременного осаждения Fe и Si, показана на рис. 1, а. На ней хорошо видны резкие рефлексы, что подтверждает успешный эпитаксиальный рост пленки Fe_3Si . Просвечивающая электронная микроскопия и рентгеновская дифракция также подтвердили монокристалличность.

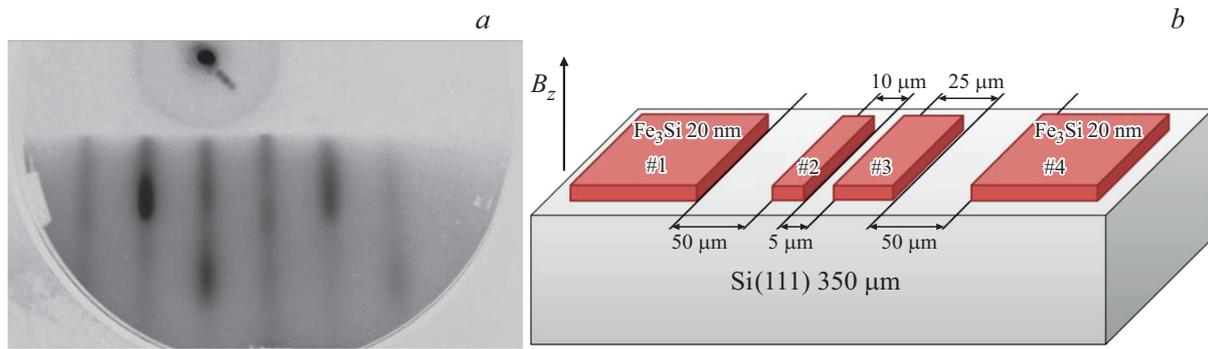


Рис. 1. *a* — *in situ* картина ДОБЭ для пленки Fe_3Si , осажденной на поверхность $\text{Si}(111)7 \times 7$ при $T = 200^\circ\text{C}$. Дифракция получена в направлении $\text{Si}\langle 101 \rangle$; *b* — схематическая иллюстрация 4Т-устройства и экспериментальной геометрии.

Для изготовления четырехтерминального (4Т) планарного устройства был использован технологический процесс, включающий стандартную фотолитографию и жидкостное химическое травление [11–13]. Для растворения пленки Fe_3Si использовался водный раствор плавиковой и азотной кислот ($\text{HF} : \text{HNO}_3 : \text{H}_2\text{O} = 1 : 2 : 400$), скорость травления в котором при комнатной температуре составила 52 \AA/s . После экспозиции маски, травления и смывки было получено финальное устройство, показанное на рис. 1, *b*. Расстояние между ближайшими контактами #2 и #3 составляет $5 \mu\text{m}$. Для проведения электрических измерений все контактные площадки Fe_3Si были соединены с контактными площадками измерительной ячейки золотыми проводами с помощью полуавтоматической установки разварки кристаллов. Затем образец был помещен в гелиевый криостат, который является частью измерительной установки [14], оснащенной электромагнитом и источником-измерителем Keithley 2634b. Во время эксперимента температура варьировалась от 4.2 до 300 К, а магнитное поле — до $\pm 1 \text{ T}$.

Сначала были измерены вольт-амперные характеристики (ВАХ) между всеми контактами (#1, #2, #3, #4) и соответствующие температурные зависимости сопротивления (рис. 2, *a*). ВАХ для всех контактов линейны (вставка на рис. 2, *a*) во всем диапазоне температур (от 4.2 до 295 К). Отсюда можно заключить, что контакт $\text{Fe}_3\text{Si}/n\text{-Si}$ омический. Также в пользу этого свидетельствует температурная зависимость сопротивления, записанная для контактов #2 и #3 (R_{23}), которая показывает типичное поведение для кремния. Странно, но это означает отсутствие потенциального барьера (Шоттки или туннельного) между Si и Fe_3Si . Причиной омического контакта между металлом и низколегированным кремнием может быть формирование промежуточного слоя $\text{Fe}_{3-x}\text{Si}_{1+x}$, обогащенного кремнием, во время начального этапа роста пленки. Далее были измерены полевые зависимости локального и нелокального напряжения ΔV при токе смещения $I = 100 \mu\text{A}$ с использованием 3Т- и 4Т-экспериментальной геометрии (рис. 2, *b* и *c*). В обоих случаях экспериментальные кривые хорошо

аппроксимируются функцией Лоренца, что указывает на спиновую аккумуляцию в кремнии [6]. Время жизни неравновесного спина может быть рассчитано из соотношения

$$\tau_s = h / (2\pi g_e \mu_B \Delta B_z), \quad (1)$$

где h — постоянная Планка, g_e — g -фактор Ланде ($g_e \approx 2$), μ_B — магнетон Бора, а ΔB_z — полуширина подгоночной кривой на ее полувысоте [12]. Анализ экспериментальных данных дает следующие результаты для 3Т- и 4Т-геометрии: $\tau_s(3\text{T}) = 137 \text{ ps}$ и $\tau_s(4\text{T}) = 134 \text{ ps}$. Рассчитанные значения времени жизни спина сравнимы с другими полученными результатами для структур на основе кремния. Так, например, в работе [15] сообщалось, что в структуре $\text{Fe}_3\text{Si}/n\text{-Si}$ со степенью допирования кремния $6 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ время жизни составляет 470 ps. В нашем предыдущем исследовании для структуры $\text{Fe}_3\text{Si}/p\text{-Si}$ было получено $\tau_s = 145 \text{ ps}$ [13]. Кроме того, следует отметить, что при охлаждении вплоть до 77 К как величина спинового сигнала ΔV , так и время жизни неравновесного спина τ_s монотонно возрастают, увеличиваясь примерно вдвое. Такое поведение легко понять, если предположить, что основными механизмами спиновой релаксации являются электрон-фононное рассеяние, а также рассеяние на ионизированных атомах допирующей примеси, что показано в теоретической работе [16]. Вместе с тем в работе [17] экспериментально продемонстрировано, что для $n\text{-Si}$ температурная зависимость τ_s обусловлена зависимостью от температуры подвижности электронов μ_n и соответственно коэффициента диффузии D_n , которые связаны соотношением Эйнштейна $D_n = \mu_n(k_B T/q)$. При охлаждении в нашей структуре будет происходить снижение числа рассеяний как на фонах, так и на ионизированных атомах, а также увеличение μ_n и D_n , что в результате увеличит τ_s .

Наиболее интересно, что наблюдается зависимость амплитуды спинового сигнала от электрического смещения. Измеряемое 3Т-напряжение ΔV_{23} возрастает с увеличением инжектируемого тока I_{12} . Однако зависимость $\Delta V_{23}(I_{12})$ не совсем линейна. Это хорошо видно из рис. 3, где показан нормированный на ток I_{12} спиновый

сигнал. В то же время напомним, что все контакты устройства омические (вставка на рис. 2, *a*). Отсюда следует, что эффективность спиновой инжекции зависит от электрического смещения. Вместе с тем рассчитанное время жизни варьируется лишь в пределах погрешности для различных значений тока I_{12} , что и следовало ожидать. В недавних работах [9,10], посвященных исследованию структур, изготовленных на основе высоколегированного кремния ($n \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) и содержащих туннельную диэлектрическую прослойку MgO, сообщалось о влиянии электрического смещения на различные спин-

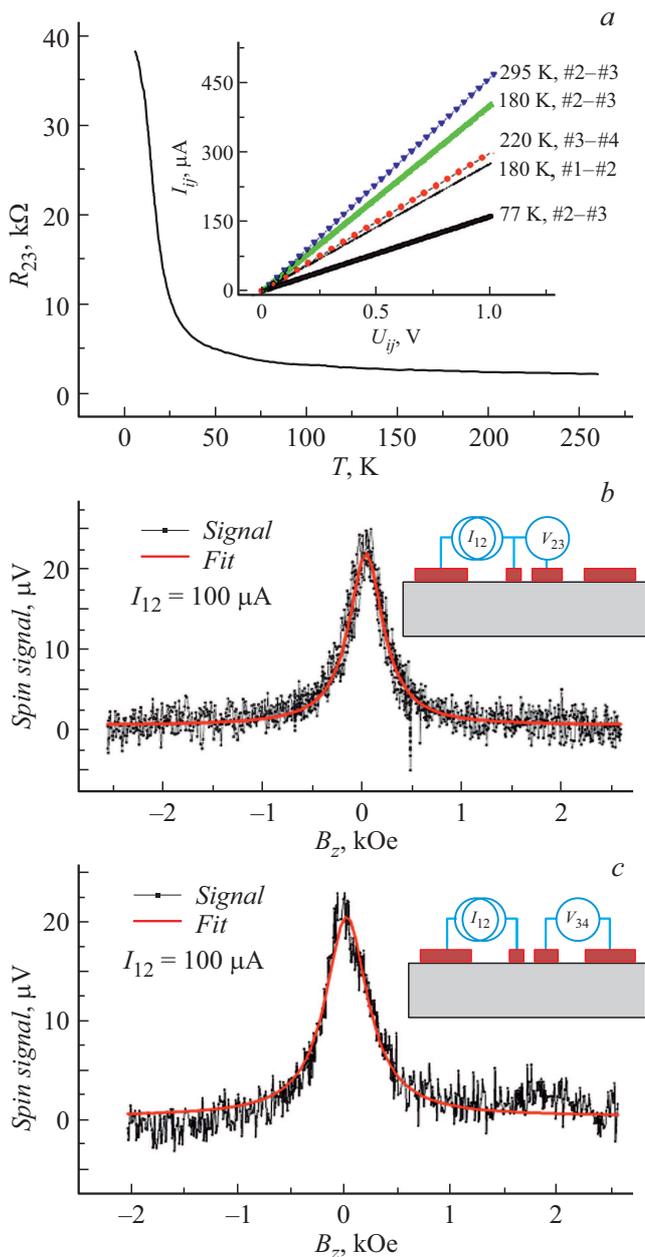


Рис. 2. *a* — температурная зависимость сопротивления, измеренная между контактами #2 и #3. На вставке показаны ВАХ для различных контактов и температур. *b, c* — спиновый сигнал ΔV , наблюдаемый в трехтерминальной (*b*) и четырехтерминальной (*c*) геометрии при комнатной температуре.

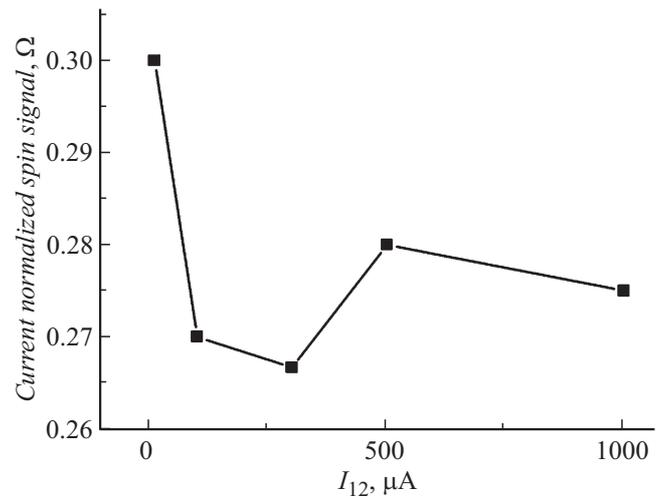


Рис. 3. Зависимость нормированного на ток I_{12} спинового сигнала ΔV от тока I_{12} , наблюдающегося в 3Т-геометрии.

зависимые транспортные данные, такие как эффективность спиновой инжекции, спиновая поляризация инжектируемого тока, 3Т- и 4Т-детектируемое напряжение ΔV . Как и в нашем случае, наблюдается тенденция снижения нормированного спинового сигнала и соответственно эффективности спиновой инжекции с увеличением электрического смещения. Можно предположить, что данная закономерность справедлива в широком диапазоне концентраций примесей невырожденного кремния ($10^{15} - 10^{18} \text{ cm}^{-3}$). Тем не менее требуются дальнейшие систематические исследования для детального понимания влияния электрического смещения и дрейфового зарядового тока на дрейфовый и диффузный спиновый ток в кремниевых устройствах. Мы надеемся, что наши экспериментальные результаты помогут разработке новых устройств ферромагнетик/полупроводник, эксплуатирующих спин-зависимые транспортные явления.

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта № 18-42-243022, Правительства РФ в рамках гранта по созданию лабораторий мирового уровня (соглашение № 075-15-2019-1886).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Fert A. // Rev. Mod. Phys. 2008. V. 80. N 4. P. 1517–1530.
- [2] Datta S., Das B. // Appl. Phys. Lett. 1990. V. 56. N 7. P. 665–667.

- [3] *Nikonov D.E., Young I.A.* // Proc. IEEE. 2013. V. 101. N 12. P. 2498–2533.
- [4] *Jansen R.* // Nature Mater. 2012. V. 11. N 5. P. 400–408.
- [5] *Thomas L., Jan G., Zhu J., Liu H., Lee Y.J., Le S., Tong R.-Y., Pi K., Wang Y.-J., Shen D., He R., Haq J., Teng J., Lam V., Huang K., Zhong T., Torng T., Wang P.-K.* // J. Appl. Phys. 2014. V. 115. N 17. P. 172615.
- [6] *Fert A., Jaffrès H.* // Phys. Rev. B. 2001. V. 64. N 18. P. 184420.
- [7] *Lou X., Adelman C., Crooker S.A., Garlid E.S., Zhang J., Reddy K.S.M., Flexner S.D., Palmstrøm C.J., Crowell P.A.* // Nature Phys. 2007. V. 3. N 3. P. 197–202.
- [8] *Jansen R., Dash S.P., Sharma S., Min B.C.* // Semicond. Sci. Technol. 2012. V. 27. N 8. P. 083001.
- [9] *Lee S., Rortais F., Ohshima R., Ando Y., Miwa S., Suzuki Y., Koike H., Shiraishi M.* // Phys. Rev. B. 2019. V. 99. N 6. P. 064408.
- [10] *Spiesser A., Fujita Y., Saito H., Yamada S., Hamaya K., Mizubayashi W., Endo K., Yuasa S., Jansen R.* // Phys. Rev. Appl. 2019. V. 11. N 4. P. 044020.
- [11] *Tarasov A.S., Lukyanenko A.V., Tarasov I.A., Bondarev I.A., Smolyarova T.E., Kosyrev N.N., Komarov V.A., Yakovlev I.A., Volochaev M.N., Solovyov L.A., Shemukhin A.A., Varnakov S.N., Ovchinnikov S.G., Patrin G.S., Volkov N.V.* // Thin Solid Films. 2017. V. 642. P. 20–24.
- [12] *Tarasov A.S., Bondarev I.A., Rautskii M.V., Lukyanenko A.V., Tarasov I.A., Varnakov S.N., Ovchinnikov S.G., Volkov N.V.* // J. Surface Investigation X-ray Synchrotron and Neutron Techniques. 2018. V. 12. N 4. P. 633–637.
- [13] *Tarasov A.S., Lukyanenko A.V., Rautskii M.V., Bondarev I.A., Smolyakov D.A., Tarasov I.A., Yakovlev I.A., Varnakov S.N., Ovchinnikov S.G., Baron F.A., Volkov N.V.* // Semicond. Sci. Technol. 2019. V. 34. N 3. P. 035024.
- [14] *Volkov N.V., Tarasov A.S., Smolyakov D.A., Gustaitsev A.O., Rautskii M.V., Lukyanenko A.V., Volochaev M.N., Varnakov S.N., Yakovlev I.A., Ovchinnikov S.G.* // AIP Adv. 2017. V. 7. N 1. P. 015206.
- [15] *Fujita Y., Yamada S., Ando Y., Sawano K., Itoh H., Miyao M., Hamaya K.* // J. Appl. Phys. 2013. V. 113. N 1. P. 013916.
- [16] *Song Y., Chalaev O., Dery H.* // Phys. Rev. Lett. 2014. V. 113. N 16. P. 167201.
- [17] *Ishikawa M., Oka T., Fujita Y., Sugiyama H., Saito Y., Hamaya K.* // Phys. Rev. B. 2017. V. 95. N 11. P. 115302.