

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ И ИНТЕРФЕЙСНЫХ СОСТОЯНИЙ НА МАГНИТО- И СПИН-ЗАВИСИМЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ ТРАНСПОРТ В ГИБРИДНЫХ СТРУКТУРАХ ФЕРРОМАГНЕТИК/ПОЛУПРОВОДНИК

Исследования спин- и магнитозависимого транспорта в различных наноструктурах ведется уже многие десятилетия. Бурное развитие этой области началось с открытия ГМС эффекта [1], а предложенный *Datta и Das* вариант спинового транзистора [2] подтолкнул исследователей на поиск и создание различных спиновых приборов [3]. В отличие от традиционной электроники, эксплуатирующей заряд электрона, спинтроника старается оперировать спином и спиновым током [4]. Наиболее многообещающая кремниевая спинтроника изучает спиновые явления в структурах и устройствах изготовленных на основе кремния. В данной работе в устройстве на основе эпитаксиальной структуры $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{n-Si}$ продемонстрирован эффект спиновой аккумуляции и исследовано влияние на него электрического смещения. Пленка ФМ силицида железа Fe_3Si была выращена на допированной фосфором подложке n-Si с ориентацией (111) и удельным сопротивлением $\rho = 2 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$ ($n = 2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) при 200 С методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Картина дифракции отраженных быстрых электронов показана на [рис. 1, а](#), на которой хорошо видны резкие рефлексy, что подтверждает успешный эпитаксиальный рост пленки Fe_3Si . Для изготовления 4-терминального планарного устройства был использован технологический процесс, включающий стандартную фотолитографию и жидкостное химическое травление [5].

ВАХ для всех контактов линейны ([вставка на рис. 2, а](#)) во всем диапазоне температур (от 4.2 К до 295 К), отсюда можно заключить, что контакт $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{n-Si}$ омический. Также в пользу этого свидетельствует температурная зависимость сопротивления, записанная с контактов #2 и #3 (R_{23}), показывающая типичное поведение кремния. Это означает отсутствие потенциального барьера между Si и Fe_3Si . Причиной омического контакта между металлом и низколегированным кремнием может быть формирование во время начального этапа роста пленки промежуточного слоя $\text{Fe}_{3-x}\text{Si}_{1+x}$ обогащённого кремнием. Были измерены полевые зависимости локального и нелокального напряжения ΔV при токе смещения $I = 100 \text{ } \mu\text{A}$ используя 3-Т и 4-Т экспериментальную геометрию ([рис. 2, б](#)). В обоих случаях кривые хорошо аппроксимируются функцией Лоренца, что указывает на спиновую аккумуляцию в кремнии. Анализ экспериментальных данных дает время жизни спина $\tau_s(3\text{T}) = 137 \text{ ps}$ и $\tau_s(4\text{T}) = 134 \text{ ps}$. Рассчитанные значения сравнимы с другими полученными результатами для структур на основе кремния. В том числе, в нашем предыдущем исследовании для структуры $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{p-Si}$ было получено $\tau_s = 145 \text{ ps}$ [5]. Также наблюдается зависимость амплитуды спинового сигнала от электрического смещения. При этом все контакты устройства омические. Отсюда следует, что эффективность спиновой инжекции зависит от смещения. В недавних работах [6,7] сообщалось, что, как и в нашем случае, наблюдается тенденция снижения нормированного спинового сигнала и, соответственно, эффективности спиновой инжекции с увеличением электрического смещения.

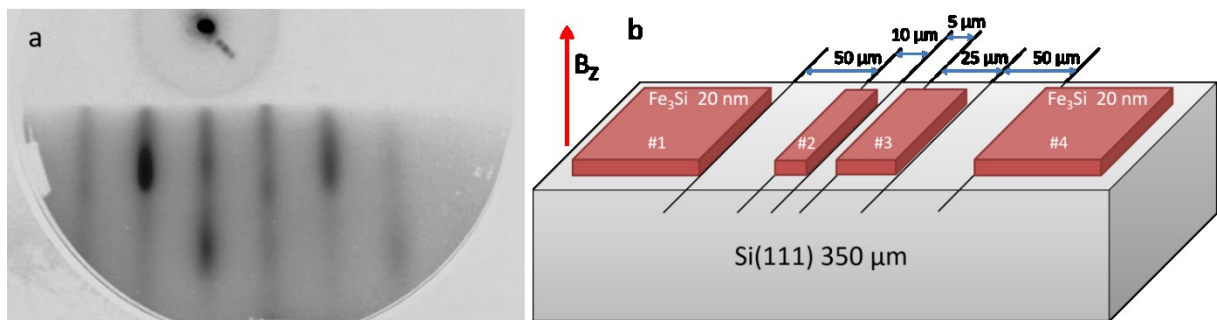


Рис. 1. *a* – *In situ* картина ДОБЭ для пленки Fe₃Si осажденной на поверхность Si(111)7x7 при T=200 C. Дифракция получена в направлении Si <101>. *b* – схематическая иллюстрация 4-T устройства и экспериментальная геометрия.

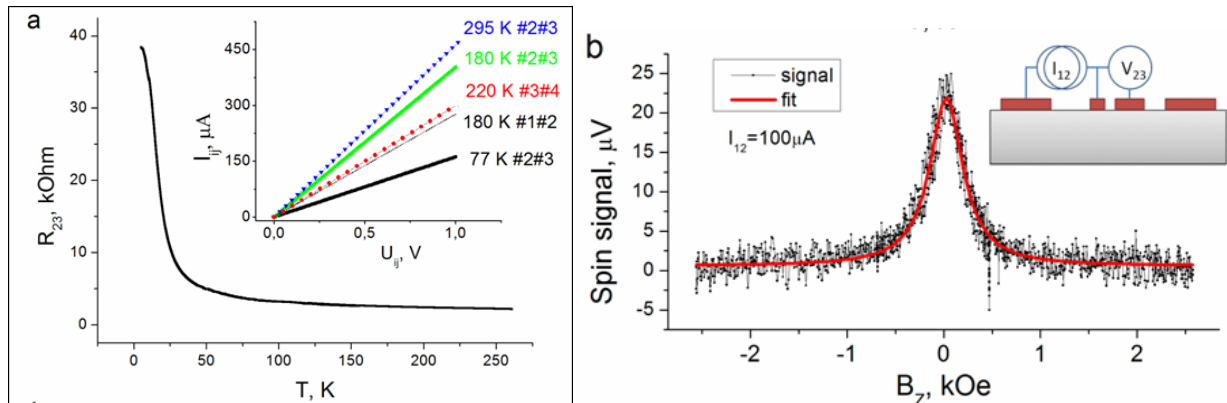


Рис. 2. Температурная зависимость сопротивления, измеренная между контактами #2 и #3. На вставке показаны ВАХ для различных контактов и температур. *b* – Спиновый сигнал ΔV наблюдаемый в 3-терминальной геометрии при комнатной температуре.

Можно предположить, что данная закономерность справедлива в широком диапазоне концентрации примесей невырожденного кремния (10^{15} - 10^{18} cm⁻³). Сравнивая наши результаты для n- и p-Si, а также учитывая литературные данные, можно заключить, что на время жизни спина, а также величину спинового сигнала в большей степени влияет концентрация носителей заряда, нежели их тип. Кроме того, условия синтеза пленок Fe₃Si на поверхности Si(111) кардинальными образом влияют на электрические свойства интерфейса.

Список литературы

1. Fert A. // Rev. Mod. Phys. 2008. V. 80. P. 1517.
2. Datta S. & Das B. // Appl. Phys. Lett. 1990. V. 56. P. 665–667.
3. Nikonov D. E., Young I. A. // Proc. IEEE. 2013. V. 101(12). P. 2498-2533.
4. Jansen R. // Nature Mater. 2012. V. 11. P. 400.
5. 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., and Volkov N.V. // Semicond. Sc. Technol. 2019. V. 34. P. 035024.
6. Smolyakov D.A., Tarasov A.S., Yakovlev I.A., Masyugin A.N., Volochaev M.N., Bondarev I.A., Kosyrev N.N., Volkov N.V. // Thin Solid Films. 2019. V. 671. P. 18-21.
7. Lee S., Rortais F., Ohshima R., Ando Y., Miwa S., Suzuki Y., Koike H., and Shiraishi M. // Phys. Rev. B 2019. V. 99. P. 064408.
8. Spiesser A., Fujita Y., Saito H., Yamada S., Hamaya K., Mizubayashi W., Endo K., Yuasa S., and Jansen R. // Phys. Rev. Applied. 2019. V. 11. P. 044020.