

Спиновая поляризация и ферромагнетизм в магнитоактивных областях кремния, легированного марганцем методом термической диффузии

О. Э. Саттаров^{а,*}, С. А. Тачилин^а, Б. А. Абдурахманов^а,
Т. Б. Исмаилов^б, Ё. О. Эргашева^с

^аТашкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова,
г. Ташкент, 100095, Узбекистан

^бНациональный университет Узбекистана имени Мирзо Улугбека, г. Ташкент, 100095, Узбекистан

^сУниверситет Сассекса, г. Брайтон, BN1 2FB, Великобритания

*e-mail: sattorov_ol@mail.ru

Поступила в редакцию 17.11.2025

После доработки 19.05.2026

Принята к публикации 26.05.2026

Исследованы структура, магнитные свойства и спиновая поляризация в кремнии с термодиффузионно введенным марганцем. Особое внимание уделено морфологическим, структурным и магнитным характеристикам полученных наноструктур, а также оценке перспектив их применения в области кремниевой спинтроники. Определены основные магнитные параметры петли магнитного гистерезиса для образцов Si<B,Mn>, измеренные при комнатной температуре $T = 300$ К. Ключевыми факторами, влияющими на магнитные свойства, являются концентрация и распределение атомов марганца в решетке кремния. При условиях диффузии $T = 1000\text{--}1050$ °С и $t = 60$ мин достигается оптимальный компромисс между достаточной глубиной проникновения Mn и предотвращением агломерации или образования вторичных фаз. Результаты магнитометрических измерений показывают, что образцы Si<B,Mn> способны сохранять ферромагнитные свойства при 300 К, что делает данный материал весьма перспективным для применения в области кремниевой спинтроники.

Ключевые слова: кремний, спинтроника, диффузия, марганец, ферромагнетизм, магнитный гистерезис

УДК 537.62

<https://doi.org/10.52577/eom.2026.62.3.24>

ВВЕДЕНИЕ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Ферромагнетизм в полупроводниках привлекает внимание в связи с возможностью создания новых типов спинтронных устройств. Кремний, являясь основным материалом микроэлектроники, обладает слабой магнитной активностью. Однако, при легировании 3d-переходными металлами, такими как марганец, возможно появление ферромагнитных свойств за счет спиновой поляризации и формирования магнитных кластеров [1–7].

Особый интерес представляет метод термической диффузии, хорошо совместимый с кремниевой технологией. В работе изучаются структура, магнитные свойства и спиновая поляризация в кремнии с диффузионно введенным марганцем [8–10].

Особое внимание уделяется морфологическим, структурным и магнитным характеристикам полученных наноструктур, а также оценке перспектив их применения в области кремниевой спинтроники [11].

Диффузия марганца осуществлялась из газовой фазы в исходный материал монокристаллический кремний р-типа, легированный бором (Si:B), с удельным сопротивлением 10 Ом·см (КДБ-10) [12–14].

Перед проведением диффузии образцы, а также кварцевые ампулы подвергались стандартной процедуре очистки для удаления органических и металлических загрязнений. После очистки кремниевые пластины помещались в вакуумированные кварцевые ампулы для последующей термической обработки [15–17].

Диффузия проводилась в температурном интервале 1000–1150 °С с шагом 25 °С. Продолжительность процесса диффузии составляла 60 мин.

После завершения диффузии ампулы охлаждались, и потом образцы подвергались технической и химической обработке в идентичных условиях. В очищенных образцах с использованием эффекта Холла на установке Van der Pauw

Таблица. Электрофизические параметры кремния легированного атомами марганца

№	Температура диффузии, $T, ^\circ\text{C}$	Исходные образцы	Подвижность носителей заряда $\left(\frac{\text{см}^2}{\text{В}\cdot\text{с}}\right)$, μ	ρ , (Ом·см) после диффузии	Концентрация носителей заряда $n, (\text{см}^{-3})$	Тип проводимости
1.	$T = 1000 ^\circ\text{C}$	КДБ-10	205	$4,9 \times 10^2$	$6,22 \times 10^{13}$	p
2.	$T = 1025 ^\circ\text{C}$		198	$1,1 \times 10^3$	$2,86 \times 10^{13}$	p
3.	$T = 1050 ^\circ\text{C}$		231	$4,2 \times 10^3$	$6,44 \times 10^{12}$	p
4.	$T = 1075 ^\circ\text{C}$		196	$8,3 \times 10^4$	$3,84 \times 10^{11}$	p
5.	$T = 1100 ^\circ\text{C}$		1165	$1,07 \times 10^3$	$5,01 \times 10^{12}$	n
6.	$T = 1150 ^\circ\text{C}$		1205	$6,2 \times 10^2$	$8,36 \times 10^{14}$	n

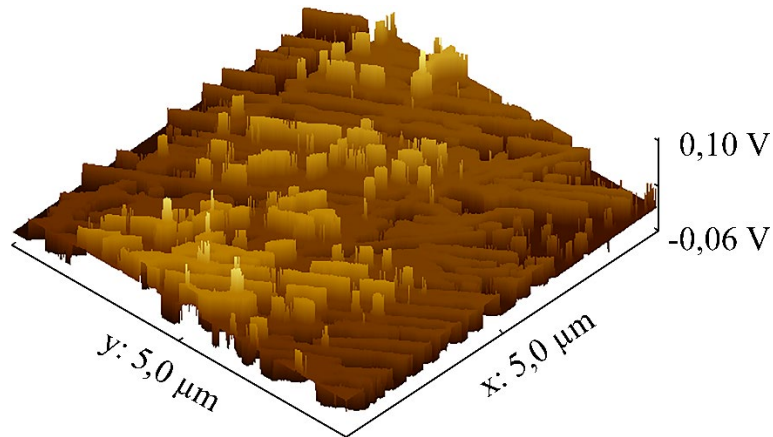


Рис. 1. Трехмерная топографическая карта поверхности кремния после диффузии марганца, полученная методом АСМ. Диапазон исследования: $5,0 \times 5,0 \text{ мкм}^2$, потенциал от $-0,06$ до $0,10 \text{ В}$.

Есориа HMS-3000 были измерены электрофизические параметры кремния, легированного атомами марганца. Полученные данные по удельному сопротивлению и типу проводимости приведены в [таблице](#).

Из [таблицы](#) видно, что, управляя температурой и временем диффузии, можно получить компенсированные, сильнокомпенсированные и перекомпенсированные образцы. Изучение морфологии поверхности, а также исследование намагниченности в таких образцах представляет особый интерес.

На [рис. 1](#) представлена трехмерная топографическая карта поверхности кремния после термодиффузионного легирования марганцем, полученная методом атомно-силовой микроскопии (АСМ). Анализ АСМ-изображения показывает, что поверхность образца характеризуется выраженной морфологической неоднородностью и развитым рельефом.

Наблюдаются хаотически распределенные выступы и впадины, что указывает на существенное изменение поверхностной структуры в результате диффузионного внедрения атомов марганца. Пространственные вариации контраста, соответствующие диапазону поверхностного потенциала от $-0,06$ до $0,10 \text{ В}$, свидетельствуют о наличии локальных областей с различной электронной плотностью.

Предполагается, что наблюдаемые неоднородности связаны с формированием кластерных образований Mn и дефектно-насыщенных областей, возникающих в процессе термической обработки. Такие структурные особенности могут приводить к локализации носителей заряда и усилению обменного взаимодействия между спинами.

Таким образом, полученные АСМ-данные указывают на то, что морфология поверхности и неоднородное распределение примеси играют ключевую роль в формировании магнитных свойств системы. В частности, наличие кластеров и дефектных областей может способствовать стабилизации ферромагнитного состояния в кремнии, легированном марганцем.

На [рис. 2](#) приведен результат энергодисперсионного анализа (EDS), выполненного на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ), образцов кремния после диффузии марганца. На спектре четко фиксируются интенсивные пики, соответствующие характеристическим линиям элементов, входящих в состав исследуемого материала.

Основной максимум при энергии около $1,74 \text{ кэВ}$ соответствует линии Si-K, что подтверждает кремниевую основу подложки. Дополнительные пики наблюдаются в области $0,28 \text{ кэВ}$ (C-K) и $0,52 \text{ кэВ}$ (O-K), что связано с наличием

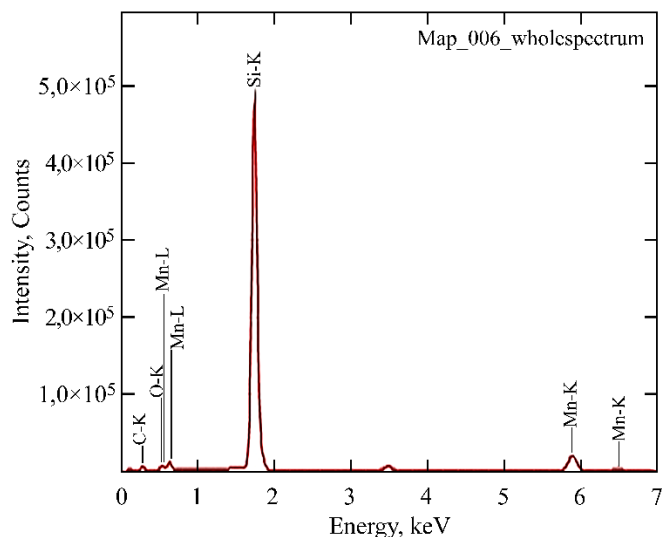


Рис. 2. Энергодисперсионный анализ (EDS), выполненный на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ), образцов кремния после диффузии марганца.

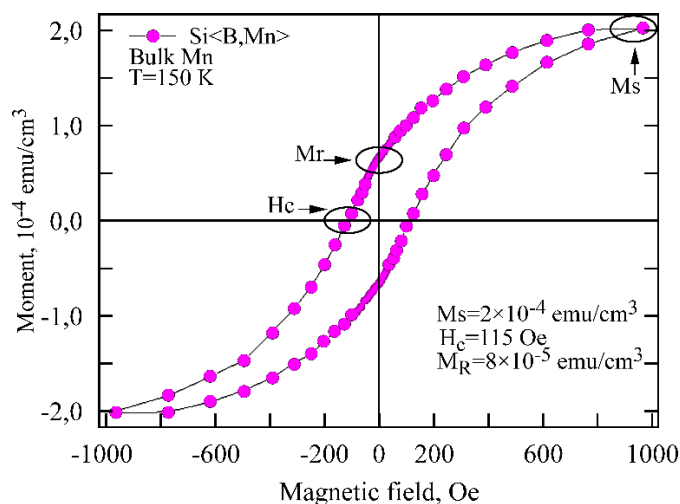


Рис. 3. Петля магнитного гистерезиса образца кремния, легированного бором и марганцем Si<B,Mn>, измеренная при температуре $T = 150$ К. Отмечены основные параметры: намагниченность насыщения (M_s), остаточная намагниченность (M_r) и коэрцитивная сила (H_c).

незначительных поверхностных загрязнений углерода и кислорода. Важным результатом является регистрация характерных линий Mn–L (около 0,63 кэВ) и Mn–K (около 5,9 кэВ), что свидетельствует об успешном внедрении атомов марганца в объем кристаллической решетки кремния.

Полученные данные подтверждают присутствие марганца в исследуемых образцах. Таким образом, СЭМ/EDS-анализ служит прямым доказательством эффективности выбранного метода диффузионного легирования.

На рис. 3 представлена петля магнитного гистерезиса образца кремния, легированного бором и марганцем Si<B,Mn>, измеренная при температуре $T = 150$ К. Для сравнения приведены магнитные характеристики массивного марганца.

Кривая демонстрирует характерное ферромагнитное поведение, выражающееся в наличии коэрцитивной силы ($H_c = 115$ Э), остаточной

намагниченности ($M_r = 0,08$ А/м) и намагниченности насыщения ($M_s = 0,2$ А/м). Наличие гистерезисной петли подтверждает индуцированный ферромагнетизм в системе Si<B,Mn>, что является результатом успешного внедрения атомов марганца и их взаимодействия с дырками, возникающими при легировании бором.

Таким образом, полученные магнитометрические данные указывают на возможность реализации ферромагнитного состояния в кремнии при использовании механизма обменного взаимодействия, опосредованного носителями заряда. Это подтверждает перспективность подобных наноструктур для применения в устройствах кремниевой спинтроники.

На рис. 4 представлена петля магнитного гистерезиса кремния, легированного бором и марганцем (Si<B,Mn>), измеренная при температуре $T = 300$ К. Для сравнения также приведены магнитные характеристики массивного марганца.

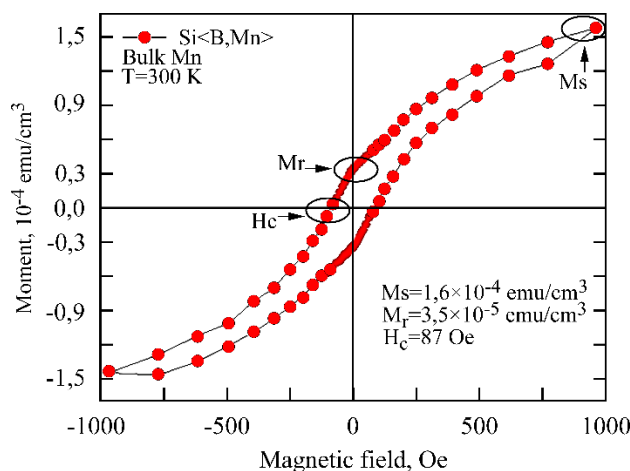


Рис. 4. Петля магнитного гистерезиса образца Si<B,Mn>, измеренная при комнатной температуре ($T = 300$ K). Определены основные магнитные параметры: $M_s = 0,16$ А/м, $M_r = 0,035$ А/м и $H_c = 87$ Э.

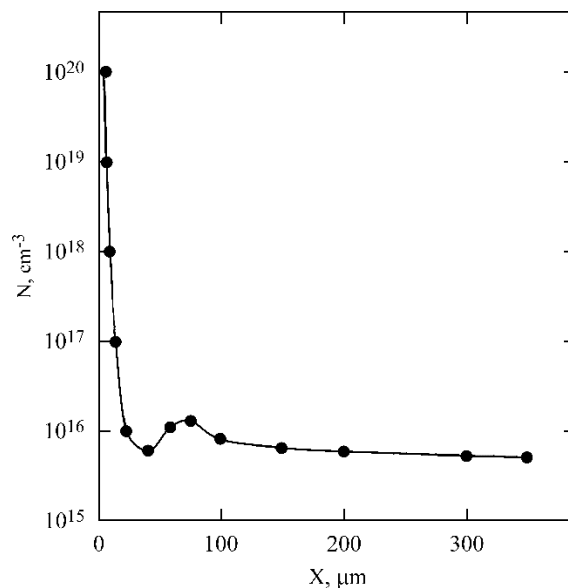


Рис. 5. Экспериментально определенное концентрационное распределение атомов марганца в решетке кремния по глубине для оптимальных условий термодиффузионного легирования $T = 1000\text{--}1050$ °С, $t = 60$ мин.

Кривая демонстрирует устойчивые ферромагнитные свойства материала при комнатной температуре, что подтверждается наличием остаточной намагниченности ($M_r = 0,035$ А/м) и конечной коэрцитивной силы ($H_c = 87$ Э). Значение намагниченности насыщения в данном случае составило $M_s = 0,16$ А/м, что несколько меньше, чем при низкой температуре (150 К).

Снижение величин M_s , M_r и H_c с ростом температуры объясняется термическим разупорядочением спинов и ослаблением обменного взаимодействия между атомами марганца. Тем не менее, сохранение гистерезисной петли при 300 К подтверждает наличие ферромагнитного состояния в системе Si<B,Mn> даже при комнатных условиях.

Таким образом, результаты магнитометрических измерений показывают, что образцы Si<B,Mn> способны сохранять ферромагнитные свойства при 300 К, что делает данный материал

весьма перспективным для применения в области кремниевой спинтроники.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты ясно указывают на возможность получения ферромагнитного состояния в кремниевых наноструктурах за счет диффузионного внедрения атомов марганца. Существование петли гистерезиса и различий между экспериментальными кривыми подтверждает наличие упорядоченного спинового состояния при комнатной температуре, что делает данные структуры потенциально пригодными для применения в спинтронике.

Одним из ключевых факторов, влияющих на магнитные свойства, является концентрация и распределение атомов марганца в решетке кремния. При условиях диффузии $T = 1000\text{--}1050$ °С, $t = 60$ мин достигается оптимальный компромисс между достаточной

глубиной проникновения Mn и предотвращением агломерации или образования вторичных фаз. Это согласуется с имеющимися работами, в которых ионная имплантация использовалась для создания аналогичных структур [18–21]. Однако, в отличие от ионной имплантации, термическая диффузия является менее разрушительным методом, обеспечивающим лучшее сохранение кристаллической решетки кремния без аморфизации поверхности. Это подтверждается данными АСМ, в которых структура остается в значительной степени упорядоченной, без значительных аморфных фаз. Экспериментально определенное концентрационное распределение атомов марганца в решетке кремния по глубине для оптимальных условий термодиффузионного легирования приведено на рис. 5 [22].

Предположительно, основным механизмом ферромагнетизма в данных системах является обменное взаимодействие между локализованными спинами и носителями заряда. Однако вклад в образование вторичных фаз, например MnSi-кластеров, не может быть полностью исключен и требует дальнейшего изучения методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии или электронной спектроскопии ядерного магнитного резонанса.

Интересно отметить, что при росте температуры выше 1075–1100 °С происходит снижение ферромагнитного эффекта, что может быть связано с перераспределением марганца, снижением его активной концентрации в решетке или рекристаллизацией структуры, нарушающей магнитную связь. В целом, работа подтверждает, что диффузионное легирование марганцем может быть эффективным методом создания магнитно-активных кремниевых структур, совместимых с существующими технологиями полупроводниковой промышленности. Это открывает перспективы для разработки новых поколений спинтронных устройств на кремниевой основе.

ВЫВОДЫ

В рамках данного исследования были получены и охарактеризованы кремниевые наноструктуры, легированные марганцем методом термической диффузии. Показано, что при оптимальных условиях диффузии с температурой 1000–1050 °С, $t = 60$ мин наблюдается устойчивое ферромагнитное поведение при комнатной температуре, подтверждаемое наличием петли гистерезиса и спиновой поляризации.

Атомы марганца почти равномерно внедряются в решетку кремния с концентрацией около 10^{16} см⁻³, образуя магнитно-активные области на глубине до 10 мкм от поверхности с предельной концентрацией до 10^{20} см⁻³.

Метод диффузии обеспечивает равномерное распределение Mn с концентрацией около 10^{16} см⁻³ в объеме без существенного повреждения кристаллической структуры кремния.

Наблюдаемый ферромагнетизм обусловлен либо обменным взаимодействием между локализованными спинами, либо присутствием мелких магнитных кластеров.

Полученные структуры демонстрируют потенциал для применения в области кремниевой спинтроники.

Работа подтверждает, что метод диффузионного легирования может служить эффективной альтернативой ионной имплантации при создании магнитных полупроводников на основе кремния с концентрацией вводимой металлической примеси около 10^{20} см⁻³. В дальнейшем планируется провести более детальное исследование фазового состава, временной стабильности магнитных свойств, а также интеграции полученных структур в планарные устройства.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

- Jungwirth, T., Sinova, J., Masek, J., Kucera, J., et al., Theory of ferromagnetic (III, Mn) V semiconductors, *Reviews of Modern Physics*, 2006, vol. 78, no. 3, p. 809. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.78.809>
- Hirohata, A., Yamada, K., Nakatani, Y., Prejbeanu, I. – L., et al., Review on spintronics: Principles and device applications, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2020, vol. 509, art. ID 166711. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.166711>
- Manipatruni, S., Nikonov, D., and Young, I., Beyond CMOS computing with spin and polarization, *Nat. Phys.*, 2018, vol. 14, p. 338. <https://doi.org/10.1038/s41567-018-0101-4>
- Dietl, T., and Ohno, H., Dilute ferromagnetic semiconductors: Physics and spintronic structures, *Reviews of Modern Physics*, 2014, vol. 86, p.187. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.86.187>
- Sinova, J., Valenzuela, S.O., Wunderlich, J., Back, C.H., et al., Spin Hall effects, *Reviews of Modern Physics*, 2015, vol. 87, p. 1213. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.87.1213>
- Zutic, I., Fabian, J., and Das Sarma, S., Spintronics: Fundamentals and applications, *Reviews of Modern Physics*, 2004, vol. 76, p. 323. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.76.323>
- Bakhadirkanov, M.K., Mavlonov, G.H., Iliev, X.M., Sattarov, O.E., et al., Specific features of magnetoresistance in overcompensated manganese-doped silicon, *Semiconductors*, 2014, vol. 48, no. 8, p. 986. [doi: 10.1134/S106378261408003X](https://doi.org/10.1134/S106378261408003X)

8. Shen, L., Zhang, Xi., Wang, H., Li, J., et al., Structural, Magnetic and Magneto-transport Properties of Mn-doped SiGe Thin Films, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2022, vol. 560, no. 8, art. ID 169630.
<https://doi.org/10.2139/ssrn.4010472>
9. Pearton, S.J., Norton, D.P., Ivill, M., Hebard, A.F., et al., Diluted magnetic semiconducting oxides, *Semicond. Sci. Technol.*, 2004, vol. 19, no.10, p. 59.
<https://doi.org/10.1088/0268-1242/19/10/R01>
10. Bakhadyrkhanov, M.K., Mavlonov, G.K., Isamov, S.B., and Tachilin, S.A., Photoconductivity of silicon with multicharged clusters of manganese atoms [Mn]₄, *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2010, vol. 46, no.3, p. 276.
[doi: 10.3103/S1068375510030154](https://doi.org/10.3103/S1068375510030154)
11. Sattarov, O.E., Abdurakhmanov, B.A., Kushiev, G.A., Tachilin, S.A., et al., Room-temperature ferromagnetism and spin polarization in silicon doped with manganese, *East European Journal of Physics*, 2026, no. 1, p. 396.
<https://doi.org/10.26565/2312-4334-2026-1-47>
12. Utamuradova, Sh.B., Mavlyanov, A.Sh., Sobirova, Sh.A., and Sattarov O.E., Hybrid Secondary Structure of Manganese and Sulfur in Silicon, *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2025, vol. 61, p. 633.
[doi: 10.3103/S1068375525700681](https://doi.org/10.3103/S1068375525700681)
13. Sattarov, O.E., Mavlyanov, A.Sh., An, A., Effect of manganese atoms on the magnetic properties of silicon, *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2023, vol. 59, no. 2, p. 216.
[doi: 10.3103/S106837552302014X](https://doi.org/10.3103/S106837552302014X)
14. Bakhadyrkhanov, M.K., Ayupov, K.S., Iliev, K.M., Mavlonov, G.K., Sattarov, O.E., Effect of electric field, illumination, and temperature on negative magnetoresistance of low-temperature-diffusion-doped silicon, *Technical Physics Letters*, 2010, vol. 36, no. 8, p. 741.
[doi: 10.1134/S1063785010080195](https://doi.org/10.1134/S1063785010080195)
15. Bakhadirhanov, M.K., Iliev, Kh.M., Ayupov, K.S., Zikrillaev, Kh.F. Negative magneto-resistance in heavily compensated silicon, *Elektronnaya Obrabotka Materialov*, 2003, no. 4, p.86.
16. Bakhadirhanov, M.K., Sattarov, O.E., Iliev, Kh.M., Ayupov, K.S., et al., Stimulation of negative magnetoresistance by an electric field and light in silicon doped with boron and manganese, *Fizika I Tekhnika Poluprovodnikov*, 2005, vol. 39, no. 7, p. 823.
17. Iliev, K.M., Saparniyazova, Z.M., Ismailov, K.A., Sattarov, O.E., et al., Interaction of radiation defects with nickel atom clusters in silicon, *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2011, vol. 47, no. 5, p. 385.
<https://doi.org/10.3103/S1068375511050103>
18. Zhang, X.Y., and Liu, Z.W., Effect of Mn diffusion on magnetic properties of Si-based diluted magnetic semiconductors, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2022, vol. 547, art. ID 168818
<https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168818>
19. Kim, S., Park, J., Kim, D., et al., Magnetic properties of Mn-doped Si nanostructures prepared by ion implantation and annealing, *Journal of Applied Physics*, 2019, vol. 125, no. 17, art. ID 173904.
<https://doi.org/10.1063/1.5085030>
20. Hamzan, N.B., Lee, M., Chang, L.J., Yeoh, K.H., et al., Structural, electronic, and magnetic properties of MnSi and Mn₄Si₇ nanowires, *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, 962, no. 5, art. ID 171097.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.171097>
21. Мильвидский, М.Г., Чалдышев, В.В., Наноразмерные атомные кластеры в полупроводниках – новый подход к формированию свойств материалов, *ФТП*, 1998, т. 32, № 5, с. 513.
22. Bakhadirhanov, M.K., Iliev, Kh.M., Tursunov, M.O., Isamov, S.B., et al., Electrical Properties of Silicon Doped with Manganese via High-Temperature Diffusion, *Inorganic Materials*, 2021, vol. 57, no. 7, p. 655.
<https://doi.org/10.1134/S0020168521070013>

Summary

This paper studies the structure, magnetic properties, and spin polarization of silicon with manganese introduced by thermal diffusion. Particular attention is paid to the morphological, structural, and magnetic characteristics of the resulting nanostructures, as well as to assessing their potential applications in silicon spintronics. The key magnetic parameters of the magnetic hysteresis loop for Si<B,Mn> samples measured at room temperature ($T = 300$ K) were determined. One of the key factors influencing the magnetic properties is the concentration and distribution of manganese atoms in the silicon lattice. Under diffusion conditions of $T = 1000\text{--}1050$ °C and $t = 60$ min, an optimal compromise is achieved between a sufficient Mn penetration depth and the prevention of agglomeration or secondary phase formation. This is in good agreement with existing studies in which ion implantation was used to create similar structures. However, unlike ion implantation, thermal diffusion is a simpler and less destructive method, ensuring better preservation of the silicon crystal lattice without surface amorphization. This is confirmed by AFM data, in which the structure remains largely ordered, without significant amorphous phases. Magnetometric measurements show that Si<B,Mn> samples are capable of retaining ferromagnetic properties at 300 K, making the studied material highly promising for applications in silicon spintronics.

Keywords: silicon, spintronics, diffusion, manganese, ferromagnetism, magnetic hysteresis