

**МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА КРЕМНИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО ПРИМЕСНЫМИ АТОМАМИ МАРГАНЦА**

Зикриллаев Нурулло Фатхаллаевич¹ - доктор физико-математических наук, профессор,
ORCID: 0000-0002-6696-5265 E-mail: n.zikrillaev@gmail.com

Курбонова Уголай Хасановна¹ - кандидат физико-математических наук, профессор,
E-mail: ogiloyxasanovna@tdtu.uz

Мавлонов Гиёсиддин Хайдарович¹ - доктор физико-математических наук, доцент,
ORCID: 0009-0008-8909-7908 E-mail: mavlonov_g@mail.ru

Кенжаев Зоир Тоирович¹ - PhD, физико-математических наук, доцент,
ORCID: 0000-0002-5335-0405 E-mail: zoir1991@bk.ru

Исмаилов Байрамбай Канатваевич² – докторант (DcS),
ORCID: 0000-0002-5880-4568 E-mail: i.bairam@bk.ru

Исмаилов Тимур Бахрамович² – базовый докторант (PhD),
ORCID: 0000-0001-9426-3095 E-mail: temurismoilov734@gmail.com

¹Ташкентский государственный технический университет им. Ислама Каримова,
Ташкент, Узбекистан

²Каракалпакского государственного университета имени Бедраха, Нукус, Узбекистан

Для контактов: Исмаилов Тимур Бахрамович-базовый докторант КГУ им. Бердаха (PhD),
E-mail: temurismoilov734@gmail.com

Аннотация. Введение. Исследования магнитных свойств образцов кремния легированного примесными атомами марганца в области низких температур ($T=30$ К) было обнаружено ферромагнитное свойства которые имели следующие параметры $M_s=3.41 \cdot 10^{-3}$ ети/см⁻³ (намагниченность насыщенное), $M_r=4.24 \cdot 10^{-4}$ ети/см⁻³ (остаточная намагниченность) и $H_c=158$ Ое (коэрцитивная сила). Показано возможности создание на основе образцов кремния диффузионно-легированного примесными атомами марганца магнитных датчики и спинтронных устройства. Показано, что образцы кремния легированного примесными атомами марганца можно рассматривать как новый магнитный полупроводниковый материал.

Методы и материалы. Магнитные свойства образцов кремния легированного примесными атомами марганца исследовалось в магнетометре марки “Quantum Design MPMS-3 SQUID VSM” при температуре $T=30$ К. Результаты исследования показали что при низких температурах $T < T_{кр}$ ($T_{кр}$ – температура Кюри) в образцах кремния с нанокластерами примесных атомов марганца появляется ферромагнитные свойства.

Результаты. Исследования магнитных свойств образцов p -Si <B, Mn> в области низких температур $T=30$ К показало, что появляется ферромагнитное состояние. Эти исследования показали, что методом диффузии примесных атомов марганца в кремний можно получить новый магнито-чувствительный полупроводниковый материал. Установлено что магнитные свойства полученных образцов зависить от зарядового и спинового состояния примесных атомов марганца в образованных нанокластерах.

Заключение. Высокая концентрация образованных много заряженных нанокластеров примесных атомов марганца (BMn_n) и наблюдаемое в них ферромагнитное состояние при $T=30$ К с параметрами позволяет использовать этот материал для создания новых видов приборов в спинтроники.



Ключевые слова: кремний, марганец, примесь, диффузия, нанокластер, гистерезис петля.

Дата поступления: 17.02.2024. После обработки: 12.03.2024. Принято печать: 14.03.2024

UDC 537.622.4

MAGNETIC PROPERTIES OF SILICON DOPED WITH IMPURITY MANGANESE ATOMS

Zikrillaev Nurullo Fatxullaevich¹ - Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor, ORCID: 0000-0002-6696-5265 E-mail: n.zikrillaev@gmail.com

Kurbonova Ugolay Xasanovna¹ - Candidate of Physical and Mathematical Sciences, professor, E-mail: ogiloyxasanovna@tdtu.uz

Mavlonov G'iyosiddin Haydarovich¹ - Doctor of Physical and Mathematical Sciences, docent, ORCID: 0009-0008-8909-7908 E-mail: mavlonov_g@mail.ru

Kenzhaev Zoir Toirovich¹ - PhD, physical and mathematical sciences, docent, ORCID: 0000-0002-5335-0405 E-mail: zoir1991@bk.ru

Ismaylov Bayrambay Kanatbaevich² – doctoral student (DcS), ORCID: 0000-0002-5880-4568 E-mail: i.bairam@bk.ru

Ismailov Timur Baxramovich² – basic doctoral student (PhD), ORCID: 0000-0001-9426-3095 E-mail: temurismoilov734@gmail.com

¹Tashkent State Technical University named after. Islam Karimov, Tashkent, Uzbekistan

²Karakalpak State University named after Bedrakh, Nukus, Uzbekistan

Abstract. Introduction. Studies of the magnetic properties of silicon samples doped with manganese impurity atoms in the low temperature region ($T=30$ K) revealed ferromagnetic properties that had the following parameters $M_s=3.41 \cdot 10^{-3}$ emu/cm³ (saturated magnetization), $M_r=4.24 \cdot 10^{-4}$ emu/cm³ (residual magnetization) and $H_c=158$ Oe (coercive force). The possibility of creating magnetic sensors and spintronic devices based on silicon samples diffusion-doped with impurity manganese atoms is shown. It has been shown that silicon samples doped with manganese impurity atoms can be considered as a new magnetic semiconductor material.

Methods and materials. The magnetic properties of silicon samples doped with manganese impurity atoms were studied in a Quantum Design MPMS-3 SQUID VSM magnetometer at a temperature $T = 30$ K. The results of the study showed that at low temperatures $T < T_{cr}$ (T_{cr} is the Curie temperature) in silicon samples with impurity nanoclusters manganese atoms exhibit ferromagnetic properties.

Results. A study of the magnetic properties of p -Si $\langle B, Mn \rangle$ samples in the low temperature region $T = 30$ K showed that a ferromagnetic state appears. These studies showed that by diffusion of impurity manganese atoms into silicon, a new magnetically sensitive semiconductor material can be obtained. It has been established that the magnetic properties of the obtained samples depend on the charge and spin state of the impurity manganese atoms in the formed nanoclusters.

Conclusion. The high concentration of highly charged nanoclusters of manganese impurity atoms (B_{Mn4}) formed and the ferromagnetic state observed in them at $T = 30$ K with parameters allows this material to be used to create new types of devices in spintronics.

Keywords: silicon, manganese, impurity, diffusion, nanocluster, hysteresis loop.





MARGANETS KIRISHMA ATOMLARI KIRITILGAN KREMNIYNING MAGNIT XUSUSIYATLARI

Zikrillaev Nurullo Fatxullaevich¹ – fizika-matematika fanlari doktori, professor,
ORCID: 0000-0002-6696-5265 E-mail: n.zikrillaev@gmail.com

Kurbonova Ugolay Xasanovna¹ – fizika-matematika fanlari nomzodi, professor,
E-mail: ogiloyxasanovna@tdtu.uz

Mavlonov G'iyosiddin Haydarovich¹ – fizika-matematika fanlari doktori, dotsent,
ORCID: 0009-0008-8909-7908 E-mail: mavlonov_g@mail.ru

Kenzhaev Zoir Toirovich¹ - fizika-matematika fanlari bo'yicha PhD, dotsent,
ORCID: 0000-0002-5335-0405 E-mail: zoir1991@bk.ru

Ismaylov Bayrambay Kanatbaevich² – doktorant (DcS),
ORCID: 0000-0002-5880-4568 E-mail: i.bairam@bk.ru

Ismailov Timur Baxramovich² – tayanch doktorant (PhD),
ORCID: 0000-0001-9426-3095 E-mail: temurismoilov734@gmail.com

¹Toshkent davlat texnika universiteti, Universitet ko'chasi 2-uy, Toshkent, O'zbekiston,
²Qoraqalpoq davlat universiteti, Nukus, O'zbekiston.

Annotatsiya. Kirish. Past haroratli muhitlarda ($T=30$ K) marganets kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy namunalarning magnit xususiyatlarini o'rganish $M_s=3,41 \cdot 10^{-3}$ emu/sm⁻³ (to'yingan magnitlanish), $M_r=4,24 \cdot 10^{-4}$ emu/sm⁻³ (qoldiq magnitlanish) va $H_c=158$ Oe (majburiy kuch). Marganets kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy namunalari asosida magnit sensorlar va spintronik qurilmalarni yaratish imkoniyati ko'rsatilgan. Marganets kirishma atomlari bilan qo'shilgan kremniy namunalari yangi magnit yarimo'tkazgich material sifatida ko'rib chiqish mumkinligi ko'rsatildi.

Usul va materiallar. Marganets kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy namunalarning magnit xususiyatlari "Quantum Design MPMS-3 SQUID VSM" magnitometri $T = 30$ K haroratda o'rganildi. Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatdiki, past haroratlarda $T < T_{cr}$ (T_{cr} - Kyuri harorati). Marganets kirishma atomlari bilan legirlangan kremniyning ko'rsatilgan temperaturada ferromagnit xususiyatlarni namoyon qiladi.

Natijalar. $T = 30$ K past haroratda p-Si <B, Mn> namunalarning magnit xususiyatlarini o'rganish ferromagnit holatning paydo bo'lishini ko'rsatdi. Ushbu tadqiqotlar shuni ko'rsatdiki, marganets atomlarini kremniyga diffuziya qilish orqali yangi magnit sezgir yarim o'tkazgich materialini olish mumkin. Olingan namunalarning magnit xossalari hosil bo'lgan nanoklasterlardagi marganets atomlarining zaryadi va spin holatiga bog'liqligi aniqlandi.

Xulosa. Marganets kirishma atomlarining (BMn_4) hosil bo'lgan yuqori zaryadlangan nanoklasterlarining yuqori konsentratsiyasi va ularda parametrlar bilan $T = 30$ K da kuzatilgan ferromagnit holati ushbu materialdan spintronikada yangi turdagi qurilmalarni yaratishda foydalanish imkonini beradi.

Kalit so'zlar: kremniy, marganets, kirishma atomlari, diffuziya, nanoklaster, histerezis halqasi.

Для цитирования: Зикриллаев Н.Ф., Курбанова У.Х., Мавлонов Г.Х., Кенжаев З.Т., Исмаилов Б.К., Исмаилов Т.Б. Магнитные свойства кремния, легированного примесными атомами марганца // Альтернативная энергетика. 2024. №1(12). С. 9-17.

Введение

Полупроводниковые материалы, легированные примесными атомами, широко используются в электронике для создания современных приборов и датчиков. Исследованием

электрофизических, фотоэлектрических, оптических и магнитных свойства кремния, легированные примесными атомами, которые создают глубокие энергетические уровни. Обнаружено ряд интересных физических явлений [1-5]. На основе полученных экспериментальных данных результатов исследования показано возможности создания новых полупроводниковых приборов с большими функциональными возможностями [6,7]. Из результатов показано, что кремний легированного примесными атомами переходных элементов было обнаружено магнитные свойства, которые были подробно исследовано и показано возможности использованы этого явления при создании приборов и устройств в спин электроники [8-10].

Получения магнитных материалов на основе кремния, легированного примесными атомами, исследован в работе [11] и авторами было показано, что ферромагнитные обменные взаимодействия в основном связано с концентрациями дырок. Авторы в работе [12] написали, что ферромагнетизм в кремний легированного примесными атомами марганца появляется из-за взаимодействия междуузельными дважды ионизируемыми ионами примесных атомов марганца. В работе [13] сообщилось, что что механизм ферромагнитных свойства кремний легированного примесными атомами марганца можно объяснить обменном носителями тока (электронов и дырок) в кластерах примесных атомов марганца.

Разногласия авторов при объяснении механизма ферромагнитных свойства кремния легированного примесными атомами марганца, по-видимому, связано от подбора метода легирования атомов марганца (ионная имплантация, диффузия из газовой фазы или легирования при выращивании в кремнии) а также от концентрации примесных атомов (фосфор и бор) в исходном материале.

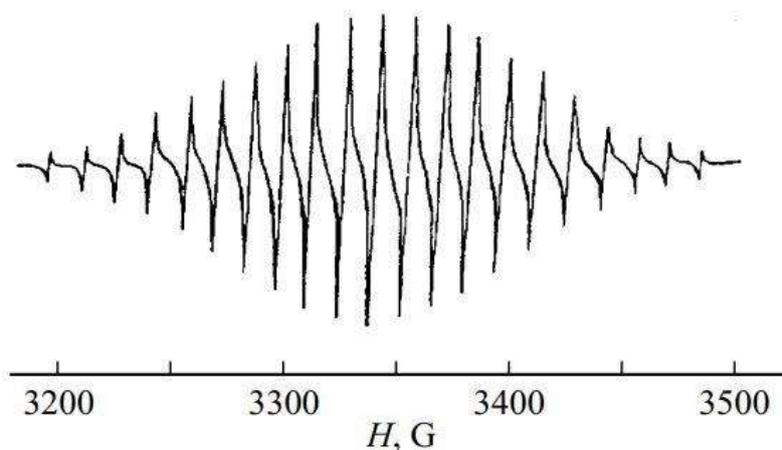


Рис. 1. Спектр ЭПР кремния легированного примесными атомами марганца.

Fig. 1. EPR spectrum of silicon doped with manganese impurity atoms.

Анализ литературных данных показало, что для определения физического механизма ферромагнитных свойств требуется более подробные исследования элементного состава кремния диффузионно-легированного примесными атомами марганца. [14]

Технология получения образцов

Для диффузии примесных атомов марганца был использован исходные образцы монокристаллического кремния марки КДБ-1;10;100 Ом·см, где концентрация атомов бора в исходном материале находился в интервале $N_B \sim 2 \cdot 10^{14} \div 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Температура и время диффузии выбирались таким, чтобы после диффузии примесных атомов марганца образцы кремния легированные примесными атомами марганца остались компенсированным и *p*-типом проводимостью.



Параметры атомов марганца, которые были использованные для получения образцов кремния с магнитными свойствами показано на таб-1.

Таблица 1

Электронная структура и электрофизические параметры примесных атомов марганца в кремнии.

Table 1

Electronic structure and electrical parameters of impurity manganese atoms in silicon.

Элемент	Электронная структура	Спин	Полная предельная растворимость, cm^{-3}	Максимальная растворимость, cm^{-3}	Энергетические уровни в кремнии, эВ
Mn	$3d^54s^2$	$\frac{5}{2}$	$2 \cdot 10^{16}$	10^{16}	$E_c - 0.43$ $E_c - 0.53$ $E_v + 0.45$

Диффузия атомов марганца проводилось в кварцевых ампулах откаченной в вакууме до $P \sim 10^{-6}$ мм. рт.ст. Кварцевая ампула с образцами исходного кремния и порошкообразными примесями марганца с чистотой 99,99% установили в электрический печ марки “MAGNETIC” при комнатной температуре $T=300$ К.

Методика эксперимента

После диффузии примесных атомов электрофизические параметры (тип проводимости, удельное сопротивление, концентрация носителей заряда, подвижность носителей заряда) образцов кремния измерялось методом Ван-дер-Паау на установке марки “Eсорia HMS-3000 Hall Measurements System”.

Топографию поверхности образцов изучали с помощью атомно-силового микроскопа марки “SPM-9700HT” (Shimadzu, Япония).

Измерение намагниченности производилось с помощью магнитометра марки “Quantum Design MPMS-3 SQUID VSM” при температуре $T=30$ К.

Экспериментальные результаты

Анализ литературных данных показало, что несмотря на многообещающие возможности формирования магнитных нанокластеров примесных атомов марганца с определёнными размерами в кремний до настоящего времени отсутствует воспроизводимая технология получения таких материалов.

На основе p - типа кремния с удельными сопротивлениями a , при $T=300$ К $\rho=3$ Ом·см были получено образцы кремния легированные примесными атомами марганца по стандартной высокотемпературной диффузии в тех условия температуры и времени в котором были полученные образцы кремния с нанокластерами. Отсутствие в этих образцах нанокластеров также было подтверждено результатами исследованием методом ЭПР.

Анализ полученных результатов дополнительного термоотжига показал, что в образцах кремния с нанокластерами примесных атомов марганца в исследуемой интервале температуры и времени наблюдается термостабильность электрофизические параметры полученных образцов. Это состояние можно объяснить тем, что образует из-за многократного положительного зарядности нанокластеров образуются кулоновские поля, в которые отталкивает дырок и притягивает электронов. [15]

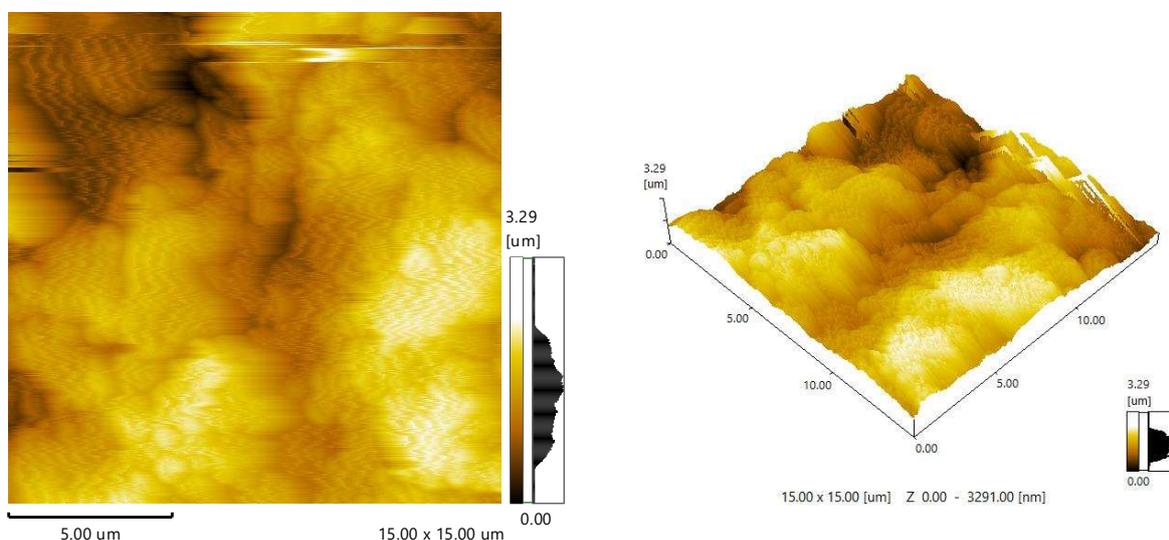
Разработанная двух этапная диффузионная технология позволила получить кремния с упорядоченным расположением нанокластеров примесных атомов марганца на поверхности и в объеме материала. Установлено, что в определенных термодинамических условиях термоотжига образуются нанокластеры примесных атомов марганца с определенными концентрациями и размерами за счёт процесса самоорганизации.

Электрофизические параметры кремния легированного примесными атомами марганца.

Electrophysical parameters of silicon doped with manganese impurity atoms.

Образы	Удельное сопротивление, ρ , Ом·см	Тип проводимость	Концентрация носителей заряда, N_p , см ⁻³	Подвижность носителей заряда, μ_p , см ² /V·с
Si<B,Mn>	$(5 \div 8) \cdot 10^3$	p	$5,2 \cdot 10^{12}$	$80 \div 170$

Из анализа полученных результатов установлено, что наиболее известным методом, стимулирующие к самоорганизации нанокластеров атомов марганца, это дополнительная термообработка полученных образцов кремния в определенной температуры и времени.

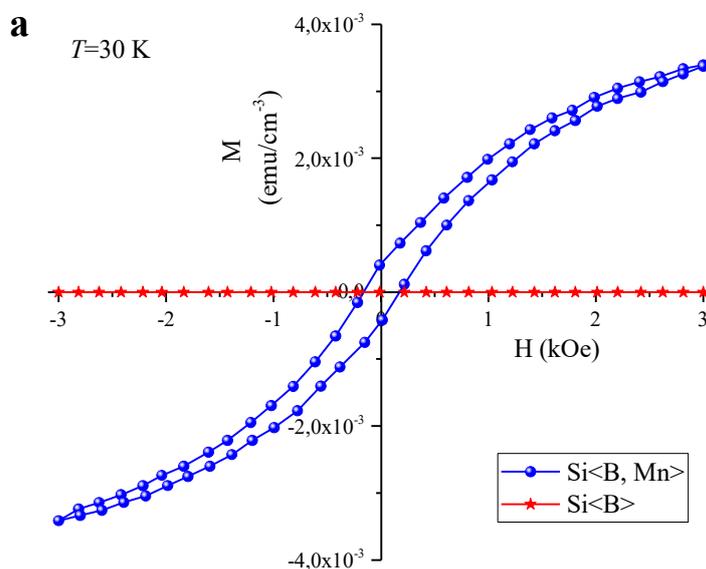


2D изображение

3D изображение

Рис. 2. Изображение поверхности кремния легированные примесными атомами марганца полученного с помощью атомно-силовым микроскопом.

Fig. 2. Image of a silicon surface doped with manganese impurity atoms obtained using an atomic force microscope.



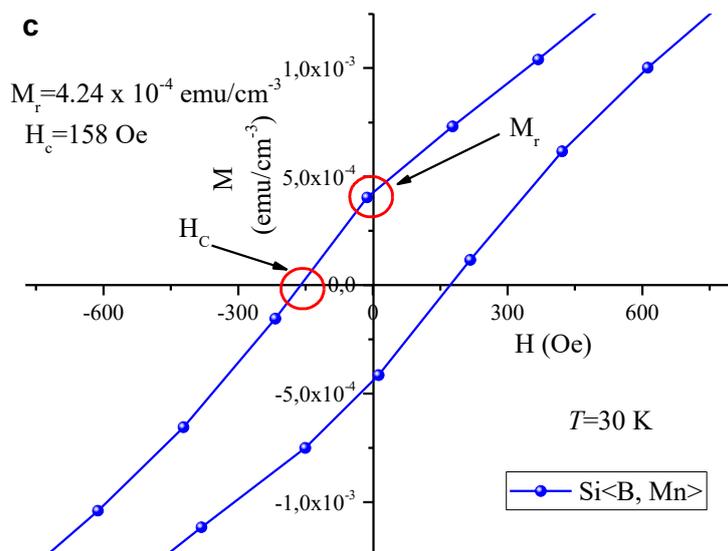


Рис. 3. Зависимость намагниченности образца $p\text{-Si} \langle B, \text{Mn} \rangle$ от магнитного поля (гистерезис Петля) при $T=30\text{ K}$.

Fig. 3. Dependence of the magnetization of the $p\text{-Si} \langle B, \text{Mn} \rangle$ sample on the magnetic field (Loop hysteresis) at $T = 30\text{ K}$.

Магнитные свойства образцов кремния легированного примесными атомами марганца исследовались в магнетометре марки “Quantum Design MPMS-3 SQUID VSM” при температуре $T=30\text{ K}$. Результаты исследования показали что при низких температурах $T < T_{\text{кр}}$ ($T_{\text{кр}}$ – температура Кюри) в образцах кремния с нанокластерами примесных атомов марганца появляется ферромагнитные свойства (рис. 3) Из анализа результатов установлено что с ростом концентрация образованных нанокластеров температура перехода к ферромагнитной состоянии смещается относительно высоких температур. На рис. 3 (b и c) показано намагниченность образцов кремния с нанокластерами атомов марганца более увеличенном размере, в котором определены значение $H_c=158\text{ Oe}$ и $M_r=4.24 \cdot 10^{-4}\text{ emu/cm}^3$.

Обсуждения полученных результатов

Исследования магнитных свойств образцов $p\text{-Si} \langle B, \text{Mn} \rangle$ в области низких температур $T=30\text{ K}$ показало, что появляется ферромагнитное состояние. Эти исследования показали, что методом диффузии примесных атомов марганца в кремний можно получить новый магнито-чувствительный полупроводниковый материал. Установлено что магнитные свойства полученных образцов завысит от зарядового и спинового состояния примесных атомов марганца в образованных нанокластерах.

Заключение

Высокая концентрация образованных много заряженных нанокластеров примесных атомов марганца (VMn_4) и наблюдаемое в них ферромагнитное состояние при $T=30\text{ K}$ с параметрами позволяет использовать этот материал для создания новых видов приборов в спинтроники.

Благодарности

Авторы выражают благодарность академику Академии наук Республики Узбекистан Сирожиддину Зайнобиддинову за ценные советы при обсуждении полученных результатов.

Литература

[1] Бахадырханов М.К., Исамов С.Б., Зикриллаев Н.Ф., Хайдаров К. Наноразмерная варизонная структура в кремнии с многозарядными нанокластерами // Микроэлектроника. 2013. Т. 42. № 6. С. 444-446.



- [2] Таскин А.А., Тишковский Е.Г. Образование квазимолекул Se в кремнии легированном селеном. ФТП, 1998, т. 32, №11, с. 1306.
- [3] Фистуль В.И., Казакова В.М., Бобриков Ю.А., Рябцев А.В., Абдурахманов К.П., Зайнабидинов С., Камиллов Т.С., Утамурадова Ш.Б. О состоянии примесных ионов марганца в кремнии // Физика и техника полупроводников. – Санкт–Петербург, 1982.– Т. 16.– В.5– С. 939-941.
- [4] Юнусов М. С. и др. О некоторых закономерностях электронного спектра примесных атомов d – элементов в кремнии. ФТП. 1995.т.4. с.714.
- [5] Мирсагатов Р.М. Метасбильность центров марганца в твердых растворах кремний-германий. ФТП. 1992, в.3, с.427.
- [6] М.К. Бахадырханов, С.Б. Исамов, Н.Ф. Зикриллаев., Х.М. Илиев, Г.Х. Мавлонов, С.В. Ковешников, Ш.Н. Ибодуллаев, Функциональные возможности кремния с нанокластерами атомов марганца. // Электронная обработка материалов. 2020. т. 56. № 2. С. 21-27.
- [7] M. Bolduc, C. Awo-Affouda, A. Stollenwerk, M. V. Huang, F. G. Ramos, G. Agnello, and V. P. LaBella, Ферромагнетизм при температуре выше комнатной в Si, имплантированном ионами Mn. Physical Review B 71, 033302 (2005).
- [8] C. Awo-Affouda, M. Bolduc, M. V. Huang, F. G. Ramos, K. A. Dunn, B. Thiel, G. Agnello, and V. P. LaBella, Влияние температуры отжига на структуру ферромагнитного кремния, имплантированного Mn, Journal of Vacuum Science and Technology, A 24, 1644 (2006).
- [9] M.K. Bakhadyrkhanov, Kh.M. Iliev, G.Kh. Mavlonov, K.S. Ayupov, S.B. Isamov, S.A. Tachilin, Кремний с магнитными нанокластерами атомов марганца — новый класс фотомагнитных материалов, Technical Physics, M 64(3) 385 (2019).
- [10] Liu Xingchong., Zhang Fengming. Ferromagnetism dependence on hole carriers in polycrystalline silicon films co-doped with Mn and B. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2009. p. 4103-4107.
- [11] F.M. Zhang, Y. Zeng, J. Gao, X.C. Liu, X.S. Wu, Y.W. Du. Ferromagnetism in Mn-doped silicon. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2004. p. 216-218.
- [12] Y.H. Kwon, T.W. Kang, H.Y. Cho, T.W. Kim. Formation mechanism of ferromagnetism in $Si_{1-x}Mn_x$ diluted magnetic semiconductors, Solid State Communications, 136 (2005) 257–261.
- [13] Z.M. Saparniyazova., M.K. Bakhadyrkhanov., O.E. Sattorov., N. Norkulov., D. Zh. Asanov., Interaction between multiply charged manganese nanoclusters and sulfur atoms in silicon. Inorganic materials, 48(4), pp. 325-328, 2012.
- [14] Z. A. Yunusov, S. U. Yuldashev, K. T. Igamberdiev, Y. H. Kwon, T. W. Kang, M. K. Bakhadyrkhanov, S. B. Isamov, N. F. Zikrillaev, Journal of the Korean Physical Society, Ferromagnetic States of p-type Silicon Doped with Mn, 64(10), 1461 (2014).
- [15] Н. Ф. Зикриллаев, С. В. Ковешников, Левент Трабзон, Г. Х. Мавлонов, Б. К. Исмаилов, Т. Б. Исмаилов, Ф. Э. Уракова., Электронная обработка материалов, Ферромагнитные свойства кремния, легированного атомами марганца. 2024, 60(3), 28–33.

References

- [1] Вахадирханов М.К., Исамов С.В., Зикриллаев Н.Ф., Хайдаров К. Nanorazmernaya varizonnaya struktura v kremnii s mnogozaryadnymi nanoklasterami // Mikroelektronika. 2013. Т. 42. № 6. С. 444-446. (In Rus).
- [2] Taskin A.A., Tishkovskiy Ye.G. Obrazovanie kvazimolekul Se v kremnii legirovannom selenom. FTP, 1998, t. 32, №11, s. 1306. (In Rus).
- [3] Fistul V.I., Kazakova V.M., Bobrikov Yu.A., Ryabsev A.V., Abduraxmanov K.P., Zaynabidinov S., Kamilov T.S., Utamuradova Sh.B. O sostoyanii primesnykh ionov margansa v kremnii // Fizika i texnika poluprovodnikov. – Sankt–Peterburg, 1982.– Т. 16.– В.5– С. 939-941.
- [4] Yunusov M. S. i dr. O nekotorykh zakonomernostyax elektronnoy spektra primesnykh atomov d – elementov v kremnii. FTP. 1995.t.4. s.714. (In Rus).





- [5] Mirsagatov R.M. Metasbilnost sentrov margansa v tverdykh rastvorax kremniy-germaniy. FTP. 1992, v.3, s.427. (*In Rus*).
- [6] M.K. Bakhadyrkhanov, S.B. Isamov, N.F. Zikrillaev., X.M. Iiev, G.X. Mavlonov, S.V. Koveshnikov, Sh.N. Ibodullaev, Funktsionalnye vozmojnosti kremniya s nanoklasteramami atomov margansa. // Elektronnaya obrabotka materialov. 2020. t. 56. № 2. S. 21-27. (*In Rus*).
- [7] M. Bolduc, C. Awo-Affouda, A. Stollenwerk, M. B. Huang, F. G. Ramos, G. Agnello, and V. P. LaBella, Ferromagnetizm pri temperature vyshе komnatnoy v Si, implantirovannom ionami Mn. Physical Review B 71, 033302 (2005). (*In Rus*).
- [8] S. Awo-Affouda, M. Bolduc, M. B. Huang, F. G. Ramos, K. A. Dunn, B. Thiel, G. Agnello, and V. P. LaBella, Vliyanie temperatury otjiga na strukturu ferromagnitnogo kremniya, implantirovannogo Mn, Journal of Vacuum Science and Technology, A 24, 1644 (2006). (*In Rus*).
- [9] M.K. Bakhadyrkhanov, Kh.M. Iiev, G.Kh. Mavlonov, K.S. Ayupov, S.B. Isamov, S.A. Tachilin, Kremniy s magnitnymi nanoklasteramami atomov margansa — noviy klass fotomagnitnix materialov, Technical Physics, M 64(3) 385 (2019). (*In Rus*).
- [10] Liu Xingchong., Zhang Fengming. Ferromagnetism dependence on hole carriers in polycrystalline silicon films co-doped with Mn and B. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2009. p. 4103-4107.
- [11] F.M. Zhang, Y. Zeng, J. Gao, X.C. Liu, X.S. Wu, Y.W. Du. Ferromagnetism in Mn-doped silicon. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2004. p. 216-218.
- [12] Y.H. Kwon, T.W. Kang, H.Y. Cho, T.W. Kim. Formation mechanism of ferromagnetism in $Si_{1-x}Mn_x$ diluted magnetic semiconductors, Solid State Communications, 136 (2005) 257–261.
- [13] Z.M. Saparniyazova., M.K. Bakhadyrkhanov., O.E. Sattorov., N. Norkulov., D. Zh. Asanov., Interaction between multiply charged manganese nanoclusters and sulfur atoms in silicon. Inorganic materials, 48(4), pp. 325-328, 2012.
- [14] Z. A. Yunusov, S. U. Yuldashev, K. T. Igamberdiev, Y. H. Kwon, T. W. Kang, M. K. Bakhadyrkhanov, S. B. Isamov, N. F. Zikrillaev, Journal of the Korean Physical Society, Ferromagnetic States of p-type Silicon Doped with Mn, 64(10), 1461 (2014).
- [15] N. F. Zikrillaev, S. V. Koveshnikov, Levent Trabzon, G. X. Mavlonov, B. K. Ismaylov, T. B. Ismailov, F. E. Urakova., Elektronnaya obrabotka materialov, Ferromagnitnye svoystva kremniya, legirovannogo atomami margansa. 2024, 60(3), 28–33. (*In Rus*).

For citation: Zikrillaev, N.F., Kurbanova, U.X., Mavlonov, G.X., Kenjaev, Z.T., Ismaylov, B.K., Ismailov, T.B. *Magnetic properties of silicon doped with impurity manganese atoms.* Alternative Energy. 2024. 1(12). Pp. 9-17. (*In Rus*.)

Correspondence: Ismailov Timur Baxramovich – Basic doctoral student (PhD),
E-mail: temurismoilov734@gmail.com