

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Кучинский, П.В. Влияние сильного электрического поля на скорость введения и пространственное распределение радиационных дефектов в кремнии / П.В. Кучинский, В.М. Ломако, А.П. Петрунин // Письма ЖТФ. – 1985. – Т. 11, № 5. – С. 309–311.
2. Кучинский, П.В. Инжекционная, электрополевая и термическая перестройка радиационных дефектов в p-кремнии / П.В. Кучинский, В.М. Ломако, А.П. Петрунин // ФТП. – 1989. – Т. 23, № 9. – С. 1625–1628.
3. Aharodnikau, D.A. The role of Si self-interstitial atoms in the formation of electrically active defects in reverse-biased silicon n+-p diodes upon irradiation with alpha particles / D.A. Aharodnikau [et al.] // Physica Status Solidi A. – 2021. – Vol. 218. – 2100104 (1 of 7).
4. Mukashev B.N., Self-interstitials in irradiated silicon / B.N. Mukashev, Kh.A. Abdullin, Y.V. Gorelinskii // Mater. Sci. Forum. – 1997. – Vol. 258–263. – P.541–546.
5. Abdullin, Kh.A. New defect states in irradiated p-type silicon / Kh.A. Abdullin [et al.] // Phys. Lett. A. – 1990. – Vol. 144, № 3. – P. 198–200.
6. Makarenko, L.F. Kinetics of self-interstitials reactions in p-type silicon irradiated with alpha particles / L.F. Makarenko [et al.] // Phys. B. – 2012. – Vol. 407, № 15. – P. 3016–319.
7. Watkins G.D. A review of ESR studies in irradiated silicon / G.D. Watkins // Radiation Damage in Semiconductors, (ed. by P. Baruch) Dunod, Paris, – 1964). P. 97–114.
8. Watkins, G.D. Metastable defects in silicon: hints for DX and EL2? / G.D. Watkins // Semicond. Sci. Technol. – 1991. – Vol. 6, № 10B. – P. B111–B120
9. Jones, R. The self-interstitial in silicon and germanium / R. Jones [et al.] // Mater. Sci. and Eng. B – 2009. – Vol. 159-160. – P. 112–116.
10. Myers, S.M. Model of defect reactions and the influence of clustering in pulse-neutron-irradiated Si / S.M. Myers, P.J. Cooper, W.R. Wampler // J. Appl. Phys. – 2008. – Vol. 104, № 4. – P. 044507.
11. Markevich, V.P. Donor levels of the divacancy-oxygen defect in silicon / V.P. Markevich [et al.] // J. Appl. Phys. – 2014. – Vol. 115. – P. 012004 (1 of 6).
12. Makarenko, L.F. Reactions of interstitial carbon with impurities in silicon particle detectors / L.F. Makarenko [et al.] // J. Appl. Phys. – 2007. – Vol. 101. – P. 113537 (1 of 6).

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА КРЕМНИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО ПРИМЕСНЫМИ АТОМАМИ НИКЕЛЯ

**Н. Ф. Зикриллаев¹, К. А. Исмаилов², З. Т. Кенжаев¹,
Б. К. Исмаилов², Т. Б. Исмаилов², Ш. З. Олламберганов²**

¹⁾ *Ташкентский государственный технический университет им. Ислама Каримова,
100095, г. Ташкент, Узбекистан. e-mail: zoir1991@bk.ru*

²⁾ *Каракалпакский государственный университет им. Бердаха, 230112, г. Нукус, Узбекистан
e-mail: temurismoilov734@gmail.com*

Исследованы ферромагнитные свойства кластеров примесных атомов никеля, образующихся в обогащенном поверхностном слое моно-Si, и были обнаружены ферромагнитные свойства. Топографию кластеров, полученных на поверхности кремния, изучали с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ). С помощью СКВИД – магнитометра была получена гистерезис-петля образцов и определены параметры остаточной намагниченности, намагниченности насыщения и коэрцитивной силы при температуре $T = 400$ К. Из результатов исследования определены размеры нанокластеров, образующих на поверхности образцов кремния и ферромагнитных свойств этих нанокластеров, а также ферромагнитные свойства при температуре $T = 400$ К кремния легированного примесными атомами Ni. Описан новый магнит-

ный материал, полученный на основе кремния, для использования в устройствах спинтроники.

Ключевые слова: нанокластер; ферромагнетизм; температура; примесь; намагниченность; SQUID; ACM.

MAGNETIC PROPERTIES OF SILICON DOPED WITH NICKEL IMPURITY ATOMS

N. F. Zikrillayev¹, K. A. Ismaylov², Z. T. Kenjayev¹,
B. K. Ismaylov², T. B. Ismailov², Sh. Z. Ollamberganov²

¹⁾ Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, 100095, Tashkent, Uzbekistan

²⁾ Karakalpak State University named after Berdakh, 230112, Nukus, Uzbekistan

Corresponding author: T. B. Ismailov (temurismoilov734@gmail.com)

The ferromagnetic properties of clusters of impurity nickel atoms formed in the enriched surface layer of mono-Si were investigated and ferromagnetic properties were found. The topography of the clusters obtained on the silicon surface was studied using atomic force microscope (AFM). The hysteresis loop of the samples was obtained and the parameters of residual magnetization, saturation magnetization and coercivity at temperature $T = 400$ K were determined using SQUID – magnetometer. The sizes of nanoclusters forming on the surface of silicon samples and ferromagnetic properties of these nanoclusters, as well as ferromagnetic properties at temperature $T = 400$ K of silicon doped with impurity Ni atoms were determined from the results of the study. A new silicon-based magnetic material for use in spintronics devices is described.

Key words: nanocluster; ferromagnetism; temperature; impurity; magnetisation; SQUID; ACM.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день в мире актуальными являются получения полупроводниковых материалов такие как Si, Ge и полупроводниковых соединения $A^{III}B^V$ легированного примесными атомами с магнитными свойствами переходных элементов железа Mn, Ni, Cr, Fe и Co [1]. Ученые и специалисты проявляют больше интереса к созданию быстродействующих магнитных сенсоров на основе новых магнитных материалов и их использования в области спинтроники [2].

Структурные и магнитные свойства низкоразмерных тонких металлических или полупроводниковых пленок с модулированной морфологией поверхности привлекают значительное внимание ученых и специалистов из-за большой важности как в фундаментальных исследованиях, так и в практическом применении [3]. Среди различных ферромагнитных материалов тонкие пленки никеля в последние годы вызывают заметный интерес своими физическими свойствами и потенциальным применением их в различных областях науки и техники, таких как носители записи, информации, спиновые клапаны, полупроводниковые магнитные датчики и резистивные переключатели [4].

В данной работе исследованы ферромагнитные свойства кремния, легированного примесными атомами Ni, образующихся на поверхности и в объеме обогащенного слоя кремния. Внедрение примесных атомов никеля в кремний, производилось путем

диффузии из напыленного слоя, которое широко используется в области полупроводникового приборостроения.

Кроме того, неэлектроактивная часть растворенных примесных атомов никеля находящихся в решетке кремния в виде междоузельных атомов, которые образуют нанокластеры, преципитаты и магнитные силициды также могут иметь магнитные свойства.

Примером таких примесей являются атомы никеля, легко образующие микрокластеры, преципитаты и силицидов в кремнии, благодаря этому, неэлектроактивная концентрация примесных атомов никеля вблизи поверхности находится в интервале $N_{Ni} = 10^{20} - 10^{21} \text{ см}^{-3}$. В то же время электроактивная концентрация никеля не превышает $N_{Ni} = 10^{15} \text{ см}^{-3}$, поэтому диффузионное легирование кремния примесными атомами никеля мало меняет электрофизические параметры полученных образцов [5].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для исследования магнитных свойства кремния легированного примесными атомами никеля в качестве исходного материала использовались кремниевые пластины марки КДБ-0,5 с *p*-типом проводимостью толщиной $d = 200 \text{ мкм}$ с удельным сопротивлением $\rho = 0,5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Концентрация атомов бора в исходном кремнии равна $N_B = 4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Диффузии примесных атомов никеля проводилась из напыленного слоя в вакууме. Толщина напыленного слоя никеля была равна на $d = 1 \text{ мкм}$. После напыления проводилась диффузия атомов никеля в кремнии при температуре $T = 850 \text{ °C}$ в течение $t = 0.5$ часа. После диффузии образцы кремния подвергались дополнительному термическому отжигу в интервале температур $T = 600 - 800 \text{ °C}$ в течение $t = 0.5$ часа, что способствовало загонке примесных атомов никеля от поверхности кремния в объем.

Напыления проводились в вакуумной установке марки «DILB832».

После получения образцов кремния измерялись электрофизические параметры (тип проводимости, удельное сопротивление, концентрация носителей заряда, подвижность носителей заряда) легированного примесными атомами никеля с помощью метода Ван-дер-Пау на установке марки «Ecoria HMS-7000» (Ecoria corporation – Южная корейя).

Топографию поверхности образцов кремния, легированного примесными атомами никеля изучали с помощью атомно-силового микроскопа марки «SPM-9700HT» (Shimadzu, Япония).

Измерение намагниченности производилось с помощью (SQUID, Superconducting Quantum Interference Device – «сверхпроводящий квантовый интерферометр») магнитометра марки «Quantum Design MPMS-3 SQUID VSM» (США) с чувствительностью не менее $2 \cdot 10^{-8} \text{ ему}$ при комнатной температуре ($T = 300 \text{ K}$).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1, *а* и *б*) мы видим, что показаны результаты атомно-силовой микроскопии нанокластеров никеля в 2D и 3D измерениях. Видно, что размер нанокластеров никеля в кристаллической решетке кремния находится в диапазоне 100–200 нм. После диффузии и каждого термообработке проводилось исследования электрофизические параметры образца кремния легированного примесными атомами никеля с помощью методом Ван-дер-Пау марки «Ecoria HMS-7000». Установлено, что не меня-

ются электрофизические параметры (тип проводимости, удельное электрическое сопротивление, концентрация носителей заряда, подвижность носителей заряда) кремния легированного примесными атомами никеля.

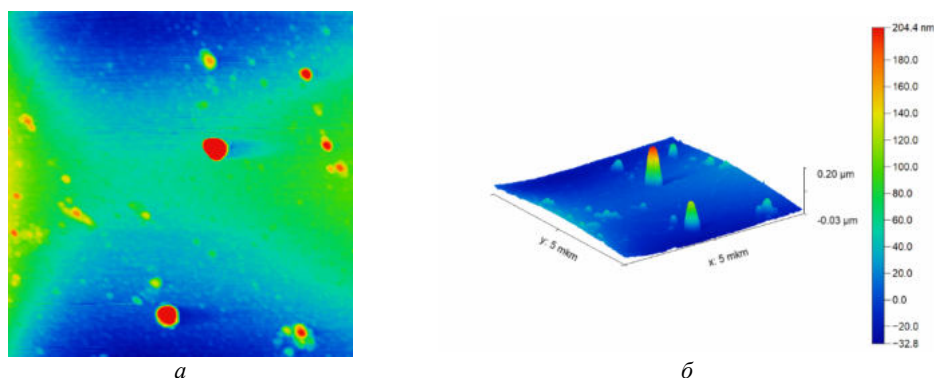


Рис. 1. Топография поверхности кремния после диффузии примесных атомов никеля, полученного в атомно-силовом микроскопе:
а – 2D-изображение; б – 3D-изображение

На рис. 1, а и б показаны результаты атомно-силовой микроскопии нанокластеров никеля в 2D и 3D измерениях. Видно, что размер нанокластеров никеля в кристаллической решетке кремния находится в диапазоне 100–200 нм. После диффузии и каждой термообработки проводились исследования электрофизических параметров образца кремния, легированного примесными атомами никеля с помощью метода Ван-дер-Пау. Было установлено, что электрофизические параметры кремния, легированного примесными атомами никеля (тип проводимости, удельное электрическое сопротивление, концентрация носителей заряда, подвижность носителей заряда), не меняются.

Электрофизические параметры кремния, легированного примесными атомами никеля

Образец	Температура диффузии T , °C	Тип прово- димости	Удельное сопротивле- ние, $\Omega \cdot \text{см}$	Концентрация, $p, n \text{ см}^{-3}$	Подвижность, μ , $\text{см}^2/(\text{V} \cdot \text{с})$
Исходный Si	–	p	0.5	$4 \cdot 10^{16}$	300
Si<Ni>	850	p	0.5	$4 \cdot 10^{16}$	285
Si<Ni>	800	p	0.5	$4 \cdot 10^{16}$	275

Из анализа полученных результатов установлено, что в определенных термодинамических условиях примесные атомы никеля в кристаллической решетке кремния могут создавать как электронейтральные, так и многозарядные нанокластеры.

Эти экспериментальные данные свидетельствуют, о том, что наличие примесных атомов никеля существенно влияет на концентрацию нанокластеров в кремнии. Это можно объяснить геттерирующими свойствами кластеров никеля в кремнии [6].

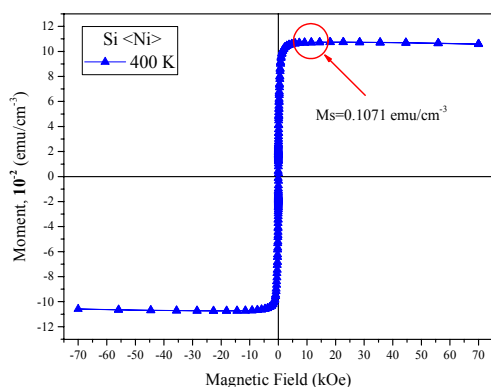


Рис. 2. Полевая зависимость кремния, легированного примесными атомами Ni при температуре $T = 400$ K

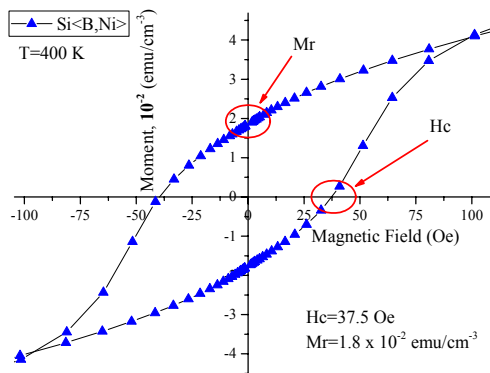


Рис. 3. Гистерезис-петля в кремнии, легированном примесными атомами Ni при температуре $T = 400$ K

Из рис. 2 видно, что при $T = 400$ K кремний, легированный атомами никеля, проявляет ферромагнитные свойства и значение намагниченности насыщения составляет $M_s = 0.1071 \text{ emu/cm}^3$.

Из рис. 3 видно, что ферромагнитные свойства нанокластеров никеля проявляются диффузией атомов никеля в кремний, а параметры коэрцитивной силы и остаточной намагниченности этих кластеров равны $H_c = 37.05 \text{ Oe}$ и $M_r = 1.8 \cdot 10^{-2} \text{ emu/cm}^3$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты в атомно-силовом микроскопе показывают образование нанокластеров примесных атомов никеля на поверхности и в объеме кремния за счет диффузии, и их размер составляет порядка ~ 200 нм.

Результаты диффузионной и дополнительной термической обработки кремния с введением атомов никеля показывают, что поверхностное и объемное сопротивление полученных образцов не изменилось, что подтверждает наличие образовавшихся нанокластеров, а не силицида.

Полевая зависимость нейтральных нанокластеров, образованных введением легирующих атомов никеля в кремний, показывает, что эти нанокластеры сохраняют свои ферромагнитные свойства не только при комнатной температуре, но и при температурах выше комнатной.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Preparation of spintronically active ferromagnetic contacts based on Fe, Co and Ni Graphene nanosheets for Spin-Field Effect Transistor / Neetu Gyanchandani [et al.] // Materials Science and Engineering: B, Vol. 261, №114772, 2020.
2. Magnetic properties of thin Ni films measured by a dc SQUID-based magnetic microscope / O.V.Snigirev [et al.] // Physical Review B, Vol 55, № 21, 1997.
3. Clusters of impurity nickel atoms and their migration in the crystal lattice of silicon / B.K. Ismaylov [et al.] // Physical Sciences and Technology, Vol. 10, p. 13–18, 2023.
4. Fabrication and optical properties of a self-organized ferromagnetic Ni/Si-nanocomposite / K. Rumpf [et al.] // Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 316, p. 114–117, 2007.
5. Thickness dependent ferromagnetism in thermally decomposed NiO thin films / P.Ravikumar [et al.] // Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol 418, p. 86–91, 2016.
6. Properties of magnetic nickel/porous-silicon composite powders / T.Nakamura // ADVANCES Vol. 2, 2012.