

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА КРЕМНИЯ С ПРИМЕСНЫМИ АТОМАМИ МАРГАНЦА В КРИТИЧЕСКИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Н. Ф. Зикриллаев¹, Т. Б. Исмаилов², У. Х. Курбанова¹,
З. Т. Кенжаев¹, Б. К. Исмаилов², Х. У. Камалов²

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: i.bairam@bk.ru*

В данной работе ферромагнитные свойства кремния изучались путем введения атомов марганца в кристаллическую решетку методом низкотемпературной диффузии. Результаты исследований показали, что за счет введения атомов бора и марганца ($\text{Si}<\text{B}, \text{Mn}>$) в кристаллическую решетку кремния можно получить новый ферромагнитный материал с принципиально другими фундаментальными параметрами. В данной работе были изучены ферромагнитные свойства нанокластеров, образующихся в кристаллической решетке кремния при низкой температуре ($T = 1.8 \text{ K}$). Результат исследования показал, что кремний обладает ферромагнитными свойствами при этой температуре. Показано, что ферромагнитные свойства полученного нового магнитного материала на основе кремния зависят от типа проводимости кремния и связаны с проводимостью p -типа. Результаты исследования термостабильности нанокластеров, состоящих из внедренных атомов бора и марганца, образующихся в кристаллической решетке кремния, показывают, что нанокластеры термостабильны ($t = 5$ часов, $T = 400 \text{ K}$). Если нанокластеры не появляются во входных атомах бора и марганца, образующихся в кристаллической решетке кремния – он не термостабилен. Теоретически расчеты показывают, что ферромагнитные свойства нанокластеров, образующихся в кристаллической решетке кремния, должны существовать даже при комнатной температуре ($T = 300 \text{ K}$).

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

MAGNETIC PROPERTIES OF SILICON WITH IMPURITY MANGANESE ATOMS AT CRITICAL TEMPERATURES CRITICALLY LOW TEMPERATURES

N. F. Zikrillayev¹, T. B. Ismailov², U. X. Kurbanova¹,
Z. T. Kenjayev¹, B. K. Ismaylov², X. U. Kamalov²

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

²⁾ *Karakalpak State University named after Berdakh, 230112, Nukus, Uzbekistan
Corresponding author: B. K. Ismaylov (i.bairam@bk.ru)*

In this research work, the ferromagnetic properties of silicon were studied by introducing manganese atoms into the crystal lattice by low-temperature diffusion. The results showed that by introducing B and Mn atoms ($\text{Si}<\text{B}, \text{Mn}>$) into the silicon crystal lattice, a new ferromagnetic material with fundamentally different fundamental parameters can be obtained. In this work, the ferromagnetic properties of nanoclusters formed in the silicon crystal lattice at low temperature ($T = 1.8 \text{ K}$) were studied and the result of the study

showed that silicon has ferromagnetic properties at this temperature. It is shown that the ferromagnetic properties of the obtained new silicon-based magnetic material depend on the conduction type of silicon and are related to the *p*-type conductivity. The results of the study of thermostability of nanoclusters consisting of input boron and manganese atoms formed in the silicon crystal lattice show that nanoclusters are thermostable ($t = 5$ hours, $T = 400$ K). If nanoclusters do not appear in the input atoms of boron and manganese formed in the silicon crystal lattice – it is not thermostable. Theoretically, calculations show that ferromagnetic properties of nanoclusters formed in the silicon crystal lattice should exist even at room temperature ($T = 300$ K).

Key words: silicon; manganese; impurity; diffusion; nanocluster; hysteresis loop.

ВВЕДЕНИЕ

Полупроводниковые материалы, легированные примесными атомами, широко используются в электронике для создания современных устройств. Были изучены электрофизические, фотоэлектрические, оптические и магнитные свойства кремния, легированного примесными атомами, образующими глубокие энергетические уровни. По результатам этих исследований было обнаружено множество интересных физических явлений [1–5], указывающих на возможность создания новых полупроводниковых приборов с повышенной функциональностью [6, 7]. В кремнии, легированном примесными атомами переходных элементов, которые Cr, Mn, Ni и Fe были обнаружены магнитные свойства и подробно исследована, и показана возможность использования этого явления для создания устройств и элементов магнетоэлектроники [8–10]. Процесс получения магнитных материалов на основе кремния, легированного примесными атомами марганца и никеля, исследован в работе [11], где авторы показали, что ферромагнитное обменное взаимодействие в основном связано с концентрацией дырок. В работе [12] ферромагнетизм в кремнии, легированном примесными атомами марганца, обусловлен междоменным двойником. В [13] сообщается, что магнетизм кремния, легированного примесными атомами марганца, может быть объяснен обменом носителей тока (дырок) с нанокластерами примесных атомов марганца.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для диффузии примесных атомов Mn были использованы образцы монокристаллического кремния марки КДБ–3 и $5 \Omega \cdot \text{см}$, где концентрация атомов бора в исходном материале находилась в интервале $N_B \sim 2 \cdot 10^{14} - 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Температура и время диффузии выбирались такими, чтобы после диффузии образцы кремния легированные примесными атомами марганца остались компенсированным и с *p*-типом проводимости [14, 15]. Концентрация и расположение атомов легирующей примеси с нанокластерами марганца на поверхности кремния зарегистрированы с помощью метода ВИМСа, марки «TOFF SIMS 5». После получения образцов электрофизические параметры измерялось методом Ван-дер-Паау на «Ecopia HMS-7000 Hall Measurements System». Измерение намагниченности производилось с помощью магнитометра марки «Quantum Design MPMS-3 SQUID VSM».

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Несмотря на многообещающий потенциал формирования магнитных нанокластеров из примесных атомов марганца определенного размера на кремнии, до сих пор не существовало воспроизводимой методики получения таких материалов.

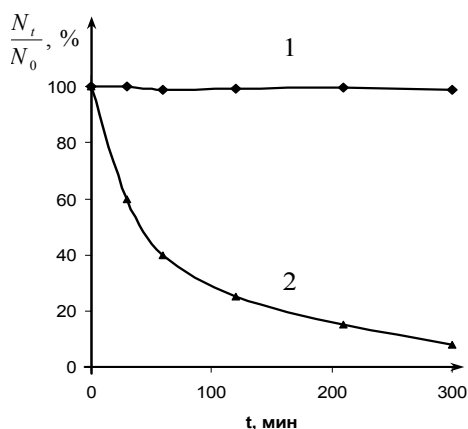


Рис. 1. Зависимость относительного изменения концентрации основных носителей заряда от времени термообработки кремния, легированного примесными атомами марганца:
1 – образцы кремния с нанокластерами примесных атомов марганца,
2 – образцы кремния без нанокластеров

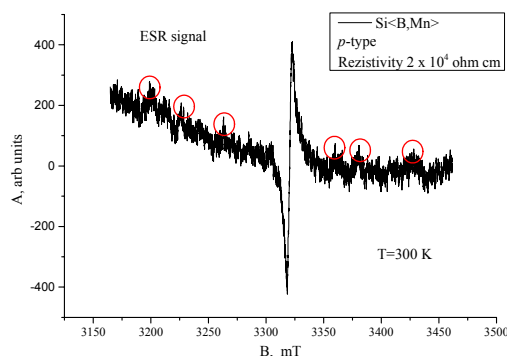


Рис. 2. Электронный парамагнитный резонанс марганца в кремнии при комнатной температуре, $T = 300$ К

На основе p -типа кремния с удельным сопротивлением $\rho = 3$ Ом·см при $T = 300$ К были получены образцы, легированные примесными атомами марганца по стандартной высокотемпературной диффузии в тех условиях температуры и времени, при которых были получены образцы кремния с нанокластерами (рис. 1). Отсутствие в этих образцах нанокластеров также было подтверждено результатами исследования методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР).

На рис. 2 показан ЭПР нанокластеров, образовавшихся в кристаллической решетке кремния. Из рисунка видно, что после внедрения атомов марганца в кристаллическую решетку кремния в спектрах ЭПР проявляются шесть линий марганца, что объясняется проявлением ферромагнитных свойств при комнатной температуре за счет соединения марганца и бора ($\text{Si}\langle\text{B}, \text{Mn}\rangle$).

Термический отжиг проводился в специальной печи при определенной температуре и времени. После каждой термической обработки образцы подвергались химической обработке для удаления пленки оксида кремния (SiO_2), и исследовались их электрические, магнитные и фотоэлектрические свойства. Как показано на рис. 1, относительное изменение концентрации дырок в исследуемых образцах зависит от времени отжига при $T = 673$ К. Видно, что концентрация дырок в образцах с нанокластеризованными примесными атомами марганца практически не изменяется в исследуемом интервале времени (кривая 1). В то же время в образце, легированном примесными атомами марганца, где нанокластеры не образуются, электрические пара-

метры существенно изменяются с увеличением времени термоотжига, и при продолжительности отжига в течение времени $t = 5$ ч электро-активные атомы марганца практически полностью переходят в нейтральное состояние (кривая 2).

Из рис. 3 видно, что основное расположение атомов марганца находится на поверхности кремния, и эти нанокластеры сочетаются с бором. Распределение атомов марганца в кристаллической решетке кремния на поверхности в 10–100 раз больше, чем во всем объеме.

Анализ полученных результатов показывает, что в образцах кремния с нанокластеризованными примесными атомами марганца в исследуемом интервале времени наблюдается термостабильность. Это состояние можно объяснить тем, что оно формируется под действием кулоновского поля множественных положительных зарядов в нанокластерах, отталкивающих дырки и притягивающих двухзарядные электроны.

Электрофизические параметры кремния, легированного атомами марганца

Образцы	Удельное сопротивление, ρ , Ом·см	Проводимость	Концентрация, N_p , см ⁻³	Подвижность, μ_p , см ² /В·с
Si<B, Mn>	$2 \cdot 10^4$	p	$5.2 \cdot 10^{12}$	80–170

Анализ полученных результатов показывает, что наиболее известным методом стимулирования самосборки нанокластеров из атомов марганца является дополнительная термообработка полученного кремниевого образца при определенной температуре и времени. Магнитные свойства образцов кремния, легированных примесными атомами Mn, исследовались на магнитометре марки «Quantum Design MPMS-3 SQUID VSM» при температуре $T = 1.8$ К. Результаты показывают, что образцы Si, легированные нанокластерами примесных атомов марганца, являются ферромагнитными при низких температурах $T < T_{kr}$ (T_{kr} – температура Кюри). Анализ результатов показывает, что температура перехода в ферромагнитное состояние смещается с увеличением концентрации образовавшихся нанокластеров относительно более высоких температур.

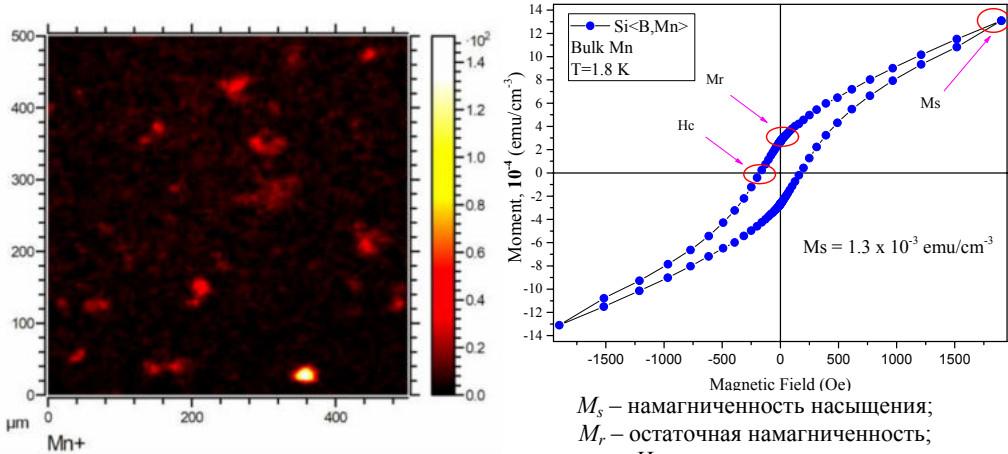


Рис. 3. Нанокластеры бора и марганца на поверхности кремния

Рис. 4. Полевая зависимость намагниченности (петля гистерезиса) образца p -Si <B, Mn>

На рис. 4 представлена зависимость намагниченности от магнитного поля в образцах кремния $\text{Si}(\text{B}, \text{Mn})$ -типа с нанокластерами атомов марганца больших размеров. Определены значения $H_c = 175 \text{ Ое}$ и $M_r = 2.6 \cdot 10^{-4} \text{ ед.и/см}^{-3}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При исследовании магнитных свойств образцов $p\text{-Si}(\text{B}, \text{Mn})$ в области критических низких температур был обнаружен ферромагнетизм в кремнии. Эти исследования показали, что диффузия примесных атомов марганца в кремнии может привести к созданию новых магниточувствительных полупроводниковых материалов. Эти исследования показывают, что примесные атомы марганца оказывают существенное влияние на магнитные свойства кремния. Установлено, что магнитные свойства полученных образцов завышены из-за зарядового и спинового состояния атомов марганца в образующихся нанокластерах. При оптимальных условиях температуры легирования и времени диффузии концентрация образовавшихся кластеров достигает $N \sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$, что свидетельствует о возможности получения материала с высокой магнитной чувствительностью. На основании анализа полученных результатов можно утверждать, что для получения магнитного кремния может быть использован более простой метод диффузионного легирования примесных атомов марганца в кремний, который приводит к образованию нанокластеров, состоящих из четырех атомов марганца и бора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Наноразмерная варизонная структура в кремнии с многозарядными нанокластерами / М.К. Бахадырханов [и др.] // Микроэлектроника. –2013.
2. О состоянии примесных ионов Mn в кремнии / Фистуль В.И [и др.] // ФТП. –1982.
3. О некоторых закономерностях электронного спектра примесных атомов d – элементов в кремнии / Юнусов М. С [и др.] // ФТП. –1995. –т.4. – с. 714.
4. Мирсагатов Р.М. Метасбильность центров марганца в твердых растворах кремний-германий. ФТП. –1992.
5. Функциональные возможности кремния с нанокластерами атомов марганца / М.К. Бахадырханов [и др.] // ЭОМ 2020. – т. 56. – № 2.
6. И.П. Суздалев. Физика-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов / Нанотехнология. –2009.
7. Above room temperature ferromagnetism in Mn-ion implanted Si / M. Bolduc [et al.] // Physical Review B, –712005.
8. Observation of crystallite formation in ferromagnetic Mn-implanted Si / C. Awo-Affouda [et al.] // Journal of Vacuum Science and Technology, – 2006.
9. Silicon with magnetic nanoclusters of manganese atoms – a new class of photomagnetic materials / M.K. Bakhadyrkhanov [et al.] // Technical Physics, 2019.
10. Liu Xingchong. Ferromagnetism dependence on hole carriers in polycrystalline silicon films co-doped with Mn and B / Zhang Fengming. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, – 2009.
11. Ferromagnetism in Mn-doped silicon / F.M. Zhang [et al.] // Journal of Magnetism and Magnetic Materials, – 2004.
12. Formation mechanism of ferromagnetism in $\text{Si}_{1-x}\text{Mn}_x$ diluted magnetic semiconductors / Y.H. Kwon [et al.] // – p. 216-218. –Solid State Communications, –2005.
13. Interaction between multiply charged manganese nanoclusters and sulfur atoms in silicon / Z.M. Saparniyazova [et al.] // Inorganic materials, –2012.
14. Ferromagnetic States of p-type Silicon Doped with Mn / Z. A. Yunusov [et al.] // Journal of the Korean Physical Society, 64(10), –1461, – (2014).
15. Болтакс Б.И. Диффузия, растворимость и электрические свойства марганца в кремнии / Бахадырханов М.К., Куликов Г.С. –ФТТ. –1972.