Получение образцов кремния, дифузионно-легированного примесными атомами марганца, с различными кристаллографическими направлениями

Н. Ф. Зикриллаев, Х. М. Илиев, А. А. Сатторов*, Г. А. Кушиев, М. М. Шоабдурахимова, Й. А. Абдуганиев

Ташкентский государственный технический университет имени И. Каримова, г. Ташкент, 100095, Узбекистан,
**e-mail: abdujalolsattorov6@gmail.com*

Поступила в редакцию 15.11.2025
После доработки 23.12.2025
Принята к публикации 26.12.2025

Рассматривается процесс получения образцов кремния, диффузионно-легированного примесными атомами марганца, с различными кристаллографическими направлениями. Цель исследования заключается в изучении влияния диффузионного легирования примесными атомами марганца на физико-химические и тензосвойства кремния, а также получении образцов кремния с кристаллографическими направлениями {111}, {110} и {100}. Определены основные технологические режимы диффузии атомов марганца в кремнии при различных температурах и кристаллографических направлениях, которые влияют на распределение примесных атомов марганца в кристаллической решетке. Экспериментальные данные подтверждают, что направление кристаллической решетки оказывает значительное влияние на эффективность легирования и характеристики получаемых материалов. Результаты работы могут быть полезны для разработки новых полупроводниковых материалов, в которых электрофизические параметры сильно зависят от кристаллографического направления.

Ключевые слова: кремний, марганец, диффузия, кристаллографическое направление, примесь, электронный микроскоп

УДК 621.315.592
https://doi.org/10.52577/eom.2026.62.1.62

ВВЕДЕНИЕ

В полупроводниковой электронике все более широко используются материалы и структуры, легированные примесными атомами, создающими глубокие энергетические уровни в запрещенной зоне материала. Интерес к использованию таких материалов связан с тем, что полупроводники, легированные примесными атомами, позволяют создать приборы, электрофизические параметры которых стабильны к внешним воздействиям (температуре, радиации, давлению и др.).

Одним из таких материалов является компенсированный кремний, диффузионно-легированный примесными атомами, создающими глубокие энергетических уровни в запрещенной зоне материала, в котором обнаружен ряд интересных физических явлений [1–4].

Из литературного анализа установлено, что исследование электрофизических свойств компенсированного кремния, легированного примесными атомами марганца, представляет не только научный интерес, но имеет большое практическое значение [5–8].

Однако исследование таких материалов и их применение в электронике ограничено тем, что технология получения компенсированных образцов кремния с заданными и воспроизводимыми электрофизическими параметрами представляет определенные трудности. Анализ полученных результатов показывает, что для получения компенсированного кремния с точным управлением степенью компенсации, удельным сопротивлением и типом проводимости необходимо определить с большой точностью растворимость и концентрацию электроактивных примесных атомов в зависимости от температуры диффузии. Постоянно поддерживать эту температуру в диффузионном процессе не всегда удается. Технологические режимы получения компенсированного кремния, диффузионно-легированного примесными атомами марганца, разработаны достаточно давно, однако до настоящего времени не было учтено влияние упругости (давления) паров диффузантов во время диффузии [9–13]. Нами впервые разработана воспроизводимая технология получения компенсированного кремния методом из

газовой фазы с управлением упругостью паров диффузанта. Результаты исследования позволили открыть новый способ диффузионной технологии легирования полупроводниковых материалов с заданными электрофизическими параметрами, а также обосновать объяснение противоречивых результатов об электрофизических свойствах полученных разными авторами образцов компенсированного кремния, легированного примесными атомами [14–20].

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ОБРАЗЦОВ

Для диффузионного легирования примесными атомами марганца были изготовлены исходные образцы кремния с кристаллографическими направлениями {111}, {110} и {100}. Образцы были получены на основе исходных промышленных монокристаллических образцов кремния КДБ-1, КДБ-10 и КДБ-100, выращенных методом Чохральского, р-типа проводимости с кристаллографическим направлением {111}. Для получения образцов кремния с другими кристаллографическими направлениями был изменен угол относительно плоскости резки закрепленного исходного кремниевого слитка на столике установки алмазной резки марки STX-402. На рис. 1 показан метод определения других осей ориентации кристаллографических направлений исходного кремния для дальнейшего исследования.

На столике-держателе алмазной резки был установлен слиток исходного кремния, который резали на пластинки и кристаллы. Столик-держатель позволил изменять положение угла закрепленного исходного кремния с кристаллографическим направлением {111}, то есть угла относительно плоскости резки, и были изготовлены образцы кремния с кристаллографическим направлением {111} (рис. 1а). Для получения исходного кремния с кристаллографическим направлением {110} столик с закрепленным слитком монокристаллического кремния поворачивается на 45° относительно первоначального положения по оси *z*. В этом положении резали пластинки толщиной 0,8 мм (рис. 1б). Из полученных пластин были изготовлены образцы исходного кремния с кристаллографическим направлением {110}. Для получения кристаллографического направления {100} столик с закрепленном слитком исходного кремния поворачивался на угол 45° относительно первоначального состояния по осям *y* и *z*, что позволило получить кристаллографическое направление {100} (рис. 1в). В этом положении из слитка исходного кремния резали пластинки толщиной 0,8 мм, и были изготовлены образцы исходного кремния с кристаллографическим направлением {100} для дальнейших исследований.

Для достоверности полученных образцов исходного кремния с кристаллографическими направлениями {111}, {110} и {100} методом рентгенодифракционного анализа были исследованы кристаллографические направления, которые подтверждали правильность определенных кристаллографических направлений полученных образцов. Перед диффузией подготовленные образцы исходного кремния с различними кристаллографическими направлениями с целью удаления образованнных механических деффектов и для получения плоскопараллельных граней механически шлифовались в суспензии карбида кремния (SiC). С поверхности образцов кремния с помощью химического травления были удалены остатки технических масел и неорганических веществ.

Для получения компенсированного кремния с максимальной электроактивной концентрацией примесных атомов марганца в качестве исходных образцов были использованы промышленный монокристаллический кремний с кристаллографическими осями ориентации {111}, {110} и {100} марки КДБ-1; КДБ-10 и КДБ-100, в которых исходные концентрации атомов бора были равны $N_B \approx 2\times10^{16}$; 2×10^{15}; 2×10^{14} см$^{-3}$ соответственно. Компенсированный кремний, легированный примесными атомами марганца, получали с помощью разработанной технологии методом двухэтапной диффузии из газовой фазы. Компьютерный расчет зависимости коэффициента диффузии от температуры позволил четко определить технологические режимы диффузии, в том числе упругости паров диффузанта марганца во время диффузии, что позволило получить образцы кремния с различным удельным сопротивлением $\rho = 10^2$–10^5 Ом×см с электронной и дырочной проводимостью (табл. 1) [21–23].

Для определения технологических режимов была проведена диффузия примесных атомов марганца в кремний из газовой фазы. Диффузия проводилась первоначально постепенным нагреванием диффузионной электрической печи марки MG17-60/300 до температуры T = 650 °C. При этой температуре образцы кремния с диффузантом марганца в кварцевых ампулах, откачанных до вакуума $P \approx 10^{-6}$ мм рт. ст., выдерживались от t = 20 мин до t = 30 мин. После этого температура печи относительно быстро поднималась

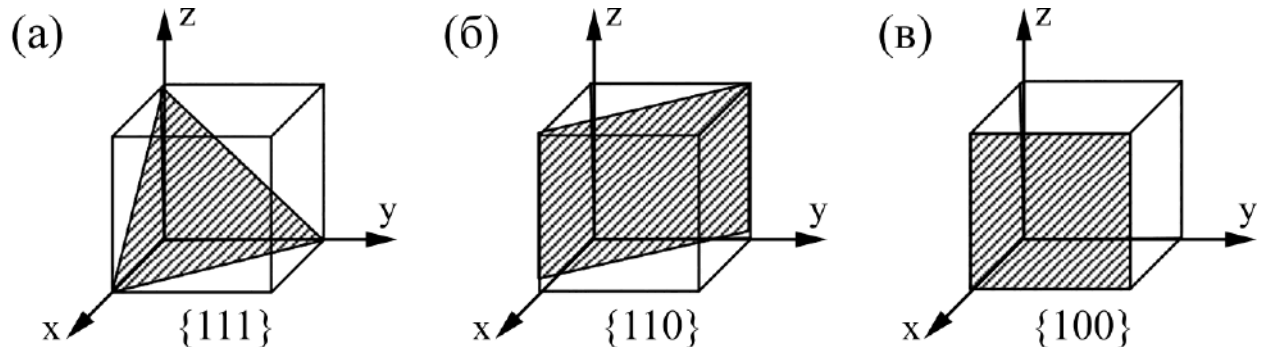


Рис. 1. Основные кристаллографические направления образцов исходного монокристаллического кремния, подготовленных к диффузии.

Таблица 1. Электрофизические параметры образцов кремния, легированного примесными атомами марганца, полученных при различных температурах диффузии

Температура диффузии, T, °C	КДБ-1, $N_B = 2\times10^{16}$ см$^{-3}$	КДБ-10, $N_B = 2\times10^{15}$ см$^{-3}$	КДБ-100, $N_B = 2\times10^{14}$см$^{-3}$
1050	65 Ом×см *p*-тип	2×10^5 Ом×см *p*-тип	$1{,}6\times10^4$ Ом×см *n*-тип
1100	80 Ом×см *p*-тип	$9{,}2\times10^4$ Ом×см *n*-тип	$7{,}4\times10^3$ Ом×см *n*-тип
1150	$1{,}2\times10^3$ Ом×см *p*-тип	$1{,}4\times10^3$ Ом×см *n*-тип	$8{,}6\times10^2$ Ом×см *n*-тип
1200	$3{,}4\times10^4$ Ом×см *p*-тип	$8{,}5\times10^3$ Ом×см *n*-тип	$3{,}8\times10^2$ Ом×см *n*-тип
1250	$1{,}4\times10^5$ Ом×см *p*-тип	$4{,}5\times10^2$ Ом×см *n*-тип	60 Ом×см *n*-тип

до температуры диффузии ($T_д$ = 900–1250 °C) и удерживалась в интервале времени t = 30–60 мин. При этом диффузия примесных атомов марганца производилась с учетом и без учета упругости паров диффузанта. Упругость паров примесных атомов марганца определялась по известному уравнению Менделеева–Клапейрона

$$PV = \frac{m}{\mu} RT_Д,$$

где P – давление паров диффузанта в кварцевой ампуле при температуре диффузии $T_Д$, R – универсальная газовая постоянная; μ – молекулярная масса диффузанта; V – объем кварцевой ампулы; m – необходимая масса диффузанта.

Из табл. 1 видно, что в зависимости от исходной концентрации примесных атомов бора при одинаковой температуре и времени диффузии легированием примесными атомами марганца были получены образцы кремния с различным удельным сопротивлением и типом проводимости.

Для разработки воспроизводимой технологии получения кремния, легированного примесными атомами марганца, также были определены температурные режимы получения образцов кремния с одинаковым удельным сопротивлением *p*-типа проводимости при различных значениях электроактивных концентраций примесных атомов (табл. 2) [24, 25]. Эти результаты иследований дали возможность четко определить технологические условия получения кремния с максимальными концентрациями электроактивных примесных атомов марганца.

Определение технологических режимов диффузии позволило получить образцы кремния, легированного примесными атомами марганца, с кристаллографическими направлениями оси ориентации {111}, {110} и {100} фактически с одинаковыми удельными сопротивлениями и типом проводимости с различными значениями концентрации электроактивных примесных атомов (табл. 2).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Элементный состав полученных образцов кремния, легированного примесными атомами марганца, исследовался на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) марки Joel JSM-IT200LA. Для определения влияния примесных атомов марганца на элементный состав исходного кремния параллельно в тех же термодинамических условиях диффузии проводился термоотжиг исходного кремния без примесных

Таблица 2. Образцы кремния с одинаковыми удельными сопротивлениями p-типа проводимости с различными значениями электроактивных концентраций примесных атомов марганца

Удельное сопротивление, Ом×см, *p*-тип	КДБ-1, $N_B = 2\times10^{16}$ см$^{-3}$	КДБ-10, $N_B = 2\times10^{15}$ см$^{-3}$	КДБ-100, $N_B = 2\times10^{14}$ см$^{-3}$
≈ 5×10^2	$T_{диф}$ = 1140 °C	$T_{диф}$ = 1000 °C	$T_{диф}$ = 900 °C
≈ 10^3	$T_{диф}$ = 1150 °C	$T_{диф}$ = 1012 °C	$T_{диф}$ = 930 °C
≈ 10^4	$T_{диф}$ = 1180°C	$T_{диф}$ = 1030 °C	$T_{диф}$ = 985 °C
≈ 10^5	$T_{диф}$ = 1240°C	$T_{диф}$ = 1050 °C	$T_{диф}$ = 1020 °C

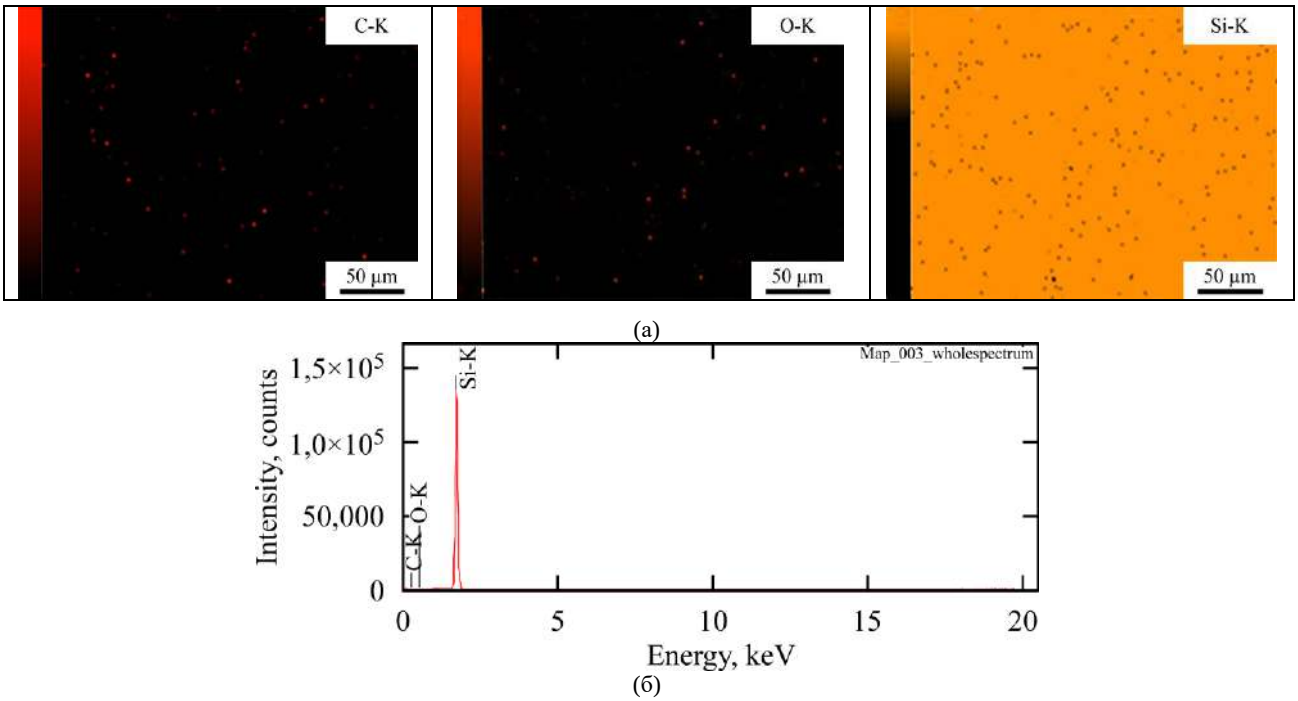


Рис. 2. Микрофотография поверхности (а) и элементный состав исходного кремния, полученного на сканирующем электронном микроскопе марки Jeol JSM-IT200LA (б).

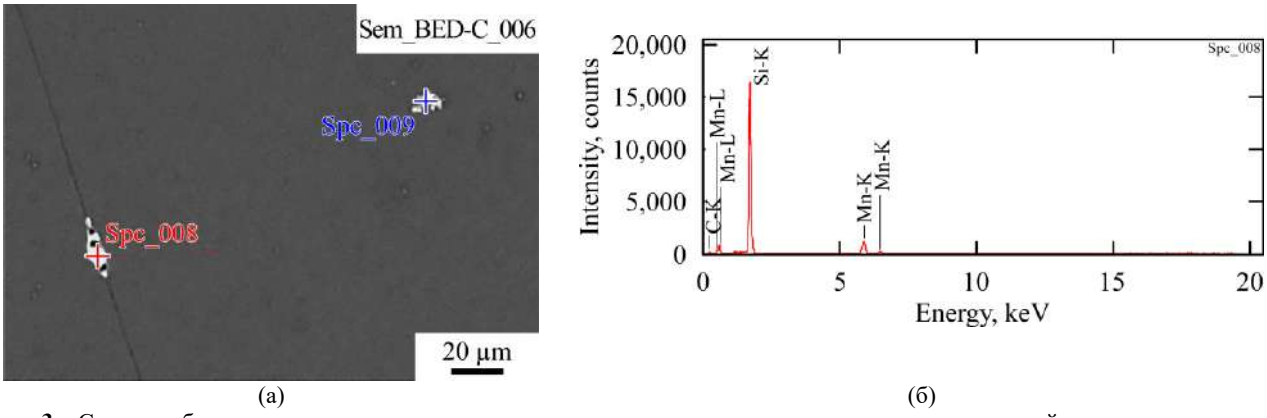


Рис. 3. Спектр образцов кремния, легированного примесными атомами марганца, полученный на сканирующем электронном микроскопе марки Joel JSM-IT200LA.

атомов марганца. На рис. 2 показаны микрофотографии поверхности и элементный состав образцов кремния без примесных атомов. Столик СЭМ позволил одновременно закрепить четыре образца кремния на специальный держатель, что дает возможность получить сравнительный анализ элементного состава образцов кремния, легированного примесными атомами марганца, относительно исходных образцов кремния. Результаты исследования показали, что в исходных образцах кремния, которые подвергались дополнительному термоотжигу при температуре диффузии, на поверхности образуется оксидный слой кремния (рис. 2б). Интенсивность пика, которая связана с образованием оксидного слоя, намного меньше, чем пик чистого кремния. Эти результаты подтверждаются экспериментальными данными, опубликованными в работах [26–28].

В образцах кремния, легированного примесными атомами марганца (рис. 3а, точка, отмеченная символом «+»), наблюдаются дополнительные пики (рис. 3б), которые показывают наличие отдельных примесных атомов марганца и нанокластеров, состоящих из нескольких атомов марганца в кремнии. Определен элементный состав поверхности кремния, легированного примесными атомами марганца, в котором масса примесных атомов составляет 24,24%, а их концентрация – 12,04% относительно кремния. Эти результаты были получены на поверхности кремния, легированного примесными атомами марганца, после очистки химическим травлением поверхности плавиковой (HF) кислотой. Исследованием установлено, что с углублением в объем концентрация примесных атомов марганца уменьшается по массе до $1{,}7\times10^{-6}$%. Такое уменьшение концентрации примесных атомов марганца объясняется максимальной растворимостью атомов марганца в исходном кремнии ($N_{Mn} \approx 2\times10^{16}$ см$^{-3}$).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из анализа полученных результатов исследования установлено, что разработанная диффузионная технология получения кремния, легированного примесными атомами марганца, с заданными электрофизическими параметрами позволяет управлять электрофизическими свойствами материала не только с помощью температуры и времени диффузионного отжига, но также выбора концентрации примесных атомов бора в исходном кремнии.

Расположение примесных атомов марганца в кристаллической решетке и термическая стабильность в кремнии до сих пор остаются плохо изученными. Несмотря на описанное во многих работах сложное взаимодействие примесных атомов марганца, замещающих атомы кремния в узлах кристаллической решетки или междоузельные состояния, оно представляет собой чрезвычайно сложную задачу. Это связано с трудным зондированием и контролем примесных атомов марганца в различных конфигурациях, таких как замещение, междоузельные состояния, а также в виде преципитатов и кластеров различных соединений и структур. Чрезвычайно низкая растворимость примесных атомов марганца в кремнии в сочетании с их высокой междоузельной диффузией приводит к образованию преципитатов на поверхности материала, что вызывает ограничение концентрации примесных атомов марганца в объеме материала в междоузельной или замещающей форме. Как известно из литературных данных, замещение основных атомов кремния примесными атомами марганца требует наличия вакансий [29].

В работе [30] авторами показана возможность создания вакансий за счет радиационных воздействий при ионной имплантации атомов марганца. Такой метод требует использования сложных современных установок с большим энергопотреблением и дополнительный термотжиг для кристаллизации поверхности и углубления атомов марганца. Разработанная низкотемпературная двухэтапная диффузионная технология позволяет получить достаточно большую концентрацию вакансий в узлах кристаллической решетки. Как показали авторы, даже в этих условиях лишь 30% атомов от общей концентрации находятся в узлах кристаллической решетки кремния. Разработанная диффузионная технология легирования примесными атомами марганца позволила получить образцы с различными удельными сопротивлениями и типом проводимости.

Из литературных данных известно, что механизмы диффузии происходят по междоузельным состояниям или по узлам кристаллической решетки. Суть двухэтапной диффузии заключается в управлении концентрацией вакансий в исходном кремнии. На первом этапе диффузии при температуре T = 650 °C происходит интенсивная генерация вакансий, то есть уход из кристаллической решетки атомов кремния. Увеличение концентрации вакансий создает благоприятные условия диффузии примесных атомов марганца по узлам кристаллической решетки кремния. Также установлено, что на первом этапе диффузии уменьшается эрозия поверхности кремния, и это позволяет закрепить диффундирующие примесные атомы марганца в узлах кристаллической решетки. Атомы марганца, находившиеся в узлах, образуют химические связи между соседними атомами кремния, при этом примесные атомы ведут себя как акцепторы, захватывая электроны из соседних узлов кристаллической решетки кремния. На втором этапе при высокотемпературной диффузии происходит в основном междоузельная диффузия, в этом случае примесные атомы марганца диффундируют между узлами кристаллической решетки. В конце диффузионного процесса образцы кремния с различными кристаллографическими направлениями охлаждались резким сбрасыванием кварцевых ампул в техническое масло, что приводило к закреплению примесных атомов по междоузлиям кристаллической структуры. В этом положении примесные атомы марганца

в кремнии ведут себя как доноры, отдавая два электрона примесным атомам бора.

Управление электрофизическими параметрами компенсированного кремния дает возможность подробнее исследовать электрические, фотоэлектрические, оптические и тензоэлектрические свойства полученных материалов. Из анализа результатов исследования установлено, что разработанная двухэтапная диффузионная технология вполне приемлема и для других легирующих примесных атомов в кремнии. Такие исследования дают достоверную информацию о роли примесных атомов, создающих глубокие энергетические уровни в запрещенной зоне кремния, что позволяет создать новое направление физики глубоких уровней в условиях сильной компенсации. Кроме того, полученные образцы кремния с различными кристаллографическими направлениями, легированные примесными атомами, позволяют исследовать влияние одноосного упругого сжатия на электрофизические параметры полученных образцов и показывают возможности создания чувствительных тензодатчиков механического давления в зависимости от кристаллографического направления оси ориентации материала. При исследовании диффузионных процессов в зависимости от направления кристаллической оси исходного кремния нами не были найдены существенные различия коэффициента диффузии примесных атомов марганца. Это можно объяснить большим значением коэффициента диффузии примесных атомов марганца в кремнии.

ВЫВОДЫ

Результаты проведенных исследований кремния, диффузионно-легированного примесными атомами марганца, показали, что при определенных термодинамических условиях (температура T = 900–1200 °C, время t = 30–60 мин) и давлении паров диффузанта при температуре диффузии ($T_д$) формируются нанокластеры атомов марганца. В образованных нанокластерах число атомов марганца может быть от четырех до сотен, которые приводят к изменению электрофизических, фотоэлектрических, оптических и тензоэлектрических свойств исходного кремния. Анализ результатов исследований показал, что для каждого элемента, диффундирующего в кремнии, существуют оптимальные параметры, при которых происходит формирование нанокластеров в кремнии. Эти результаты исследования позволяют создать полупроводниковые приборы с управляемыми электрофизическими параметрами и определить анизотропные свойства полученных образцов кремния с различными кристаллографическими направлениями.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них отсутствует конфликт интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yang, L., Fan, Y., Lv, X., Pang, H., et al., Effect of erbium incorporation on SiN_xO_y/c-Si interface in silicon-based optoelectronic devices, *IEEE Trans. Electron Devices*, 2023, vol. 70, no. 11, p. 5757. https://doi.org/10.1109/ted.2023.3316147
2. Prestat, E., Porret, C., Favre-Nicolin, V., Tainoff, D., et al., Investigations of segregation phenomena in highly strained Mn-doped Ge wetting layers and Ge quantum dots embedded in silicon. *Appl. Phys. Lett.*, 2014, vol. 104, no. 10, art. ID102409. https://doi.org/10.1063/1.4867651
3. Bakhadirkhanov, M.K., Isamov, S.B., Zikrillaev, N.F., Iliev, Kh.M., et al., Functional capabilities of silicon with nanoclusters of manganese atoms, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2020, vol. 56, no. 6, p. 734. https://doi.org/10.3103/S1068375520060046
4. Karazhanov, S.Z., Properties of precisely compensated semiconductors, *Semiconductors*, 2000, vol. 34, no. 8, p. 872. https://doi.org/10.1134/1.1188091
5. Bakhadyrkhanov, M.K., Azimkhuzhaev, K., Zikrillaev, N.F., Sabdullaev, A.B., et al., Control of the excitation conditions and the parameters of self-sustained oscillations of current in compensated silicon doped with manganese, *Semiconductors*, 2000, vol. 34, no. 2, p. 171. https://doi.org/10.1134/1.1187929
6. Mavlonov, G.H., Isamov, S.B., Koveshnikov, S.V., Zikrillaev, Kh.F., et al., Ordering of europium magnetic domains in silicon at room temperature, Indian J. Phys., 2024, vol. 98, no. 13. p. 1. https://doi.org/10.1007/s12648-024-03473-0
7. Zamudio-Bayer, V., Leppert, L., Hirsch, K., Langenberg, A., et al., Coordination-driven magnetic-to-nonmagnetic transition in manganese-doped silicon clusters, *Phys. Rev. B*, 2013, vol. 88, no. 11, art. ID 115425. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.88.115425
8. Yunusov, Z.A., Yuldashev, Sh.U., Igamberdiev, Kh.T., Kwon, Y.H., et al., Ferromagnetic states of p-type silicon doped with Mn. *J. Korean Phys. Soc.*, 2014, vol. 64, no. 10, p. 1461. https://doi.org/10.3938/jkps.64.1461
9. Roth, T., Rosenits, P., Diez, S., Glunz, S.W., et al., Electronic properties and dopant pairing behavior of manganese in boron-doped silicon, *J. Appl. Phys.*, 2007, vol. 102, no. 10, art. ID 103716. https://doi.org/10.1063/1.2812698.
10. Bakhadyrkhanov, M.K., Mavlonov, G.Kh., Isamov, S.B., Iliev, Kh.M., et al., Transport properties of silicon doped with manganese via low-temperature diffusion, *Inorg. Mater.*, 2011, vol. 47, no. 5, p. 479. https://doi:10.1134/S0020168511050062

11. Saymbetov, A., Muminov, R., Japashov, N., Toshmurodov, Y., et al., Physical processes during the formation of silicon-lithium p-i-n structures using double-sided diffusion and drift methods, *Materials*, 2021, vol. 14, no. 18, art. ID 5174. https://doi:10.3390/ma14185174
12. Feklisova, O.V., Yakimov, E.B., Boström, O. and Pichaud, B., Reconstruction of diffusion length distributions in semiconductors by photocurrent measurements with the depletion region modulation. *J. Appl. Phys.*, 1999, vol. 86, no. 9, p. 5070. https://doi:/10.1063/1.371481
13. Yakimov, E.B. and Privezentsev, V.V., SEM-EBIC investigation of silicon, compensated by zinc during high temperature diffusion annealing, *J. Mater. Sci. Mater. Electron*., 2008, vol. 19, no. SUPPL. 1, p. 277. https://doi:/10.1007/s10854-008-9730-1
14. Zainabidinov, S.Z., Mamatkarimov, O.O., Tursunov, I.G. and Tuychiev, U.A., Dynamic strain conductivity of compensated silicon, *Mod. Phys. Lett. B*, 1998, vol. 12, no. 9, p. 335. https://doi:10.1142/S0217984998000421
15. Zikrillaev, N.F., Mavlonov, G.H., Trabzon, S.L., Isamov, B., et al., Magnetic properties of silicon doped with impurity atoms of europium, *J. Nano- Electron. Phys.*, 2023, vol. 15, no. 6, art. ID 06001. https://doi:/10.21272/jnep.15(6).06001
16. Bakhadyrkhanov, M.K., Isamov, S.B., Zikrillaev, N.F. and Tursunov, M.O., Anomalous photoelectric phenomena in silicon with nanoclusters of manganese atoms, *Semiconductors*, 2021, vol. 55, no. 6, p. 542. https://doi:10.1134/S1063782621060038
17. Bakhadyrkhanov, M.K., Isamov, S.B. and Zikrillaev, N.F., Current-voltage behavior of silicon containing nanoclusters of manganese atoms, *Inorg. Mater.*, 2014, vol. 50, no. 4, p. 325. https://doi:/10.1134/S0020168514040025
18. Saparniyazova, Z.M., Ismailov, K.A., Uteniyazov, A.K. and Kamalov, K.U., Effect of the diffusion temperature on interaction of clusters with impurity atoms in silicon, *Semicond. Phys. Quantum Electron. Optoelectron.*, 2021, vol. 24, no. 1, p. 255. https://doi:/10.15407/spqeo24.01.22
19. Mylvaganam, K. and Zhang, L., Effect of crystal orientation on the formation of bct-5 silicon, *Appl. Phys. Mater. Sci. Process.*, 2015, vol. 120, no. 4, p. 1391. https://doi./10.1007/s00339-015-9323-9
20. Гревцов, Н.Л., Клименко, А.В., Гурбо, А.Д., Бондаренко, В.П., Влияние кристаллографической ориентации кремниевых пластин на механизм их анодизации, *Доклады БГУИР*, 2020, № 18 (1), с. 59. https://doi:/10.35596/1729-7648-2020-18-1-59-66
21. Chu, J. and Bao, Y., Volatilization behavior of manganese from molten steel with different alloying methods in vacuumб *Metals*, 2020, vol. 10, no. 10, art. ID 1348. https://doi:/10.3390/met10101348
22. Hamzan, N.B., Ng, C.Y.B., Sadri, R., Lee, M.K., et al., Controlled physical properties and growth mechanism of manganese silicide nanorods, *J. Alloys Compd.*, 2021, vol. 851, art. ID 156693. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.156693
23. Gee, R. and Rosenqvist, T., Vapour pressure of liquid manganese and activities in liquid Mn-Si AND carbon-saturated Mn-Si alloys, *Scand. J. Metall.*, 1976, vol. 5, no. 2. p. 57. https://doi:/10.1134/S0036029509050048
24. Bakhadirkhanov, M.K., Zikrillaev, N.F., Narkulov, N., Sadykov, U.H., et al., About concentration of electroactive atoms of elements of transition groups in silicon, *Surf. Eng. Appl. Electrochem*., 2005, no. 2. p. 86.
25. Bakhadyrkhanov, M.K., Zikrillaev, N.F. and Toshev, A.R., A photodetector based on strongly compensated silicon doped with manganese, *Appl. Sol. Energ.*, 2001, vol. 37, no. 2. p. 6.
26. Fainer, N.I., Plekhanov, A.G., Golubenko, A.N. and Rumyantsev, Y.M., Structure and elemental composition of transparent nanocomposite silicon oxycarbonitride films, *J. Struct. Chem.*, 2017, vol. 58, no. 1, p. 119. https://doi:/10.1134/S0022476617010188
27. Bakhadirkhanov, M.K., Askarov, S.I. and Norkulov, N., Some features of chemical interaction between a fast diffusing impurity and a group VI element in silicon, *Phys. Status Solidi A*, 1994, vol. 142, no. 2, p. 339.
28. Zikrillaev N.F., Ayupov, K.S., Shoabdirahimova, M.M., Urakova, F.E., et al., Effect of compensation degree and concentration of impurity electroactive selenium atoms on current auto-oscillation parameters in silicon, *East Eur. J. Phys.*, 2023, vol. 2023, no. 4, p. 251. https://doi:/10.26565/2312-4334-2023-4-31
29. Zikrillaev, N.F., Kushiev, G.A., Isamov, S.B., Abdurakhmanov, B.A., et al., Photovoltaic properties of silicon doped with manganese and germanium, *J. Nano- Electron. Phys*., 2023, vl. 15, no. 1, art. ID 01021. https://doi.org/10.21272/jnep.15(1).01021
30. Da Silva, Wahl, U., Correia, J.G., Amorim, J.M., et al., Direct observation of the lattice sites of implanted manganese in silicon, *Appl. Phys. A*, 2016, vol. 122, no. 3, art. ID 241. https://doi.10.1007/s00339-016-9724-4

Summary

This paper deals with the process of obtaining silicon samples diffusion-doped with impurity manganese atoms with different crystallographic directions. The aim of the research is to investigate the influence of diffusion doping of impurity manganese atoms on physicochemical and tenso-properties of silicon, as well as to obtain silicon samples with crystallographic directions {111}, {110} and {100}. The main technological modes of diffusion of manganese atoms in silicon at different temperatures and from the crystallographic direction, which affect the distribution of impurity manganese atoms in the crystal lattice, have been determined. Experimental data confirm that the direction of the crystal lattice has a significant influence on the doping efficiency and characteristics of the obtained materials. The results of the work can be useful for the development of new semiconductor materials, in which the electrophysical parameters strongly depend on the crystal direction of the orientation axis.

Keywords: silicon, manganese, diffusion, crystal direction, impurity, microscope