Высокотемпературная диффузия марганца в кремний КДБ-3: формирование фаз Mn_5Si_3 и B_6Si, морфология и электрофизические свойства

© Н.Ф. Зикриллаев [1], С.О. Саидов [2], Н.Ю. Шарибаев [3], Г.Х. Мавлонов [1], Й.А. Абдуганиев [1], Э.С. Назаров [2], И.О. Косимов [4], А.К. Эргашов [3]

[1] Ташкентский государственный технический университет им. Ислама Каримова,
100095 Ташкент, Узбекистан
[2] Бухарский государственный университет,
200118 Бухара, Узбекистан
[3] Наманганский государственный технический университет,
160103 Наманган, Узбекистан
[4] Институт биоорганической химии им. А. Садыкова,
100125 Ташкент, Узбекистан

E-mail: safo.saidov.64@mail.ru

Поступила в Редакцию 25 июля 2025 г.
В окончательной редакции 27 ноября 2025 г.
Принята к публикации 28 ноября 2025 г.

Исследовано формирование структурно-фазовых и электрофизических свойств кремния КДБ-3 после высокотемпературной диффузии марганца при 1100 °C в условиях замкнутого объема. Методами рентгенофазового анализа показано образование приповерхностного двухфазного слоя, включающего интерметаллическое соединение Mn_5Si_3 и борсилицид B_6Si, при высокой доле аморфизованной компоненты. Сканирующая электронная микроскопия выявила выраженный полимасштабный рельеф, представленный макро-, микро- и наноструктурированными элементами, отражающими неоднородность процессов перераспределения материала в ходе диффузии. Электрофизические измерения показали значительное увеличение удельного сопротивления, снижение подвижности носителей и уменьшение их концентрации, что обусловлено сочетанием аморфной матрицы и распределенных силицидных включений. Полученные результаты демонстрируют взаимосвязь фазового состава, морфологии и транспорта заряда в системе Si:Mn и определяют механизмы формирования функциональных свойств модифицированного кремния КДБ-3.

Ключевые слова: кремний КДБ-3, диффузия марганца, фазовый состав, Mn_5Si_3, B_6Si, морфология поверхности, рентгенофазовый анализ, электрофизические свойства.

DOI: 10.61011/FTP.2025.10.62341.8429

1. Введение

Высокотемпературная диффузия переходных металлов в кремний является эффективным методом управляемой модификации приповерхностных слоев и изменения их структурных и электрофизических свойств. Поведение 3*d*-примесей в кремнии определяется их растворимостью при повышенных температурах, взаимодействием с легирующими компонентами подложки и формированием устойчивых силицидных соединений. Эти процессы контролируются температурой обработки, временем выдержки и режимом охлаждения, определяя фазовый состав и степень структурной перестройки материала [1].

Системы Si–Mn представляют интерес ввиду возможности образования интерметаллической фазы Mn_5Si_3, обладающей устойчивой кристаллической структурой и специфическими электронными свойствами. Современные исследования подтверждают воспроизводимость формирования Mn_5Si_3 на кремниевых подложках при высоких температурах. Mn обладает ограниченной растворимостью в объеме Si, но при высоких T происходит поверхностная сегрегация, что способствует формированию Mn_5Si_3 и чувствительности ее морфологии к режимам подготовки образца [2–4]. Эта фаза играет ключевую роль в структурной организации поверхностного слоя в системах Si–Mn и является объектом активного изучения в настоящее время.

Для достоверной интерпретации структурных преобразований используется комплексный методический подход: рентгенофазовый анализ (XRD) обеспечивает идентификацию образующихся соединений; электронная микроскопия (SEM/EDS) (Scanning Electron Microscopy)/(Energy-Dispersive *X*-ray Spectroscopy) позволяет исследовать морфологию поверхности и особенности наноструктуры; применение программного обеспечения для обработки дифракционных данных (поиск максимумов, аппроксимация профиля, полуколичественный анализ методом RIR (Reps in Reserve) (Повторения в запасе)), выполненное с использованием программного пакета Match! 4.5 (Crystal Impact) с базой ICSD, повышает точность фазовой идентификации и воспроизводимость анализа [5].

В настоящей работе исследован кремний КДБ-3, подвергнутый высокотемпературной диффузии марганца

при 1100 °C. Цель исследования — установить взаимосвязь между фазовым составом приповерхностного слоя (Mn_5Si_3, B_6Si), морфологическими особенностями поверхности и электрофизическими характеристиками модифицированного слоя. Для достижения поставленной цели выполнены рентгенофазовый анализ, микроструктурные исследования (SEM), электрофизические измерения, а также подготовлен полный набор исходных экспериментальных данных для обеспечения прозрачности и воспроизводимости результатов [6].

2. Методика и экспериментальные результаты

2.1. Образцы и методика проведения диффузии марганца

В качестве исходного материала использовали борированные монокристаллические пластины (фабричные) кремния марки КДБ-3, ориентации (100), с удельным сопротивлением $\rho \approx 3$ Ом · см. Перед термообработкой проводили стандартную химическую очистку по процедуре RCA (Root Cause Analysis) [7] и удаляли приповерхностный слой кремния толщиной ~ 100 мкм. Такая подготовка позволяет исключить влияние поверхностных зон с повышенной концентрацией примесей и обеспечивает воспроизводимость последующей высокотемпературной диффузии [5].

Диффузию марганца осуществляли в запаянных кварцевых ампулах. Кремниевые образцы помещали в ампулу совместно с металлическим Mn, после чего систему откачивали до остаточного давления $\sim 10^{-6}$ мм рт.ст. и запаивали (основные параметры и схематическое представление процесса диффузии Mn в кремнии КДБ-3 приведены в табл. 1 и рис. 1 соответственно). Нагрев осуществляли в трубчатой диффузионной печи со скоростью 10–15 °C/мин строго до 1100 °C — температуры, при которой в системе Si–Mn стабильно формируется фаза Mn_5Si_3 и термически активизируется бор исходного КДБ-3, что приводит к образованию B_6Si. Фаза B_6Si возникает исключительно за счет перераспределения фабричного бора в подложке КДБ-3 при 1100 °C, дополнительное легирование бором не проводилось. Длительность выдержки при максимальной температуре составляла 10–15 ч, что обеспечивает достижение квазистационарного состояния и формирование устойчивых силицидных соединений в системе Si–Mn–B [1,3]. По завершении выдержки ампулы извлекали из печи и подвергали быстрому охлаждению до комнатной температуры. Такой режим подавляет дальнейшее перераспределение Mn и ограничивает рост крупных силицидных включений. Ранее показано, что высокотемпературные процессы в замкнутом объеме при температурах ~ 1100 °C приводят к формированию в приповерхностной зоне кремния интерметаллической фазы Mn_5Si_3, а в присутствии бора — и борсилицидных соединений B_6Si [2–6]. Как было показано выше,

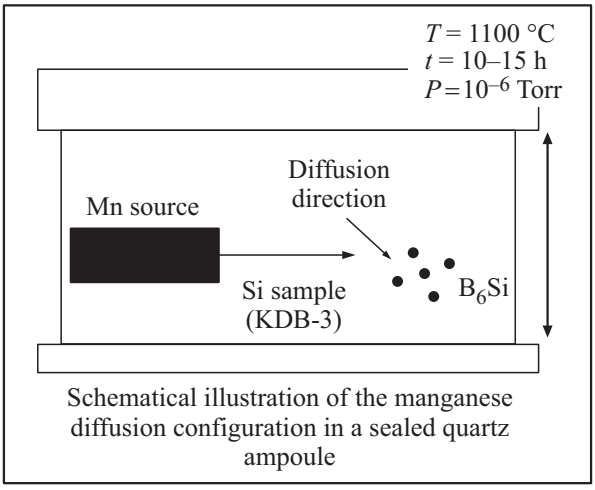

Рис. 1. Схематическое представление процесса диффузии Mn в кремнии КДБ-3 при 1100 °C.

Таблица 1. Основные параметры диффузии Mn

Параметры	Значение/описание
Тип подложки	Монокристаллический Si КДБ-3, (100), p-тип, $\rho \approx 3$ Ом · см
Метод введения Mn	Твердофазная диффузия из металлического источника в запаянной ампуле
Температура диффузии	1100 °C
Время выдержки	10–15 ч
Атмосфера	Вакуум $\sim 10^{-6}$ мм рт. ст.
Скорость нагрева	10–15 °C/мин
Режим охлаждения	Быстрое охлаждение

марганец слабо растворяется в объемном кремнии и при высоких температурах преимущественно концентрируется в приповерхностной зоне, где его накопление приводит к зарождению силицидной фазы Mn_5Si_3. Также экспериментальные и теоретические исследования адсорбции и диффузии марганца на кремнии подтверждают склонность Mn к образованию силицидных кластеров и слоев при повышенных температурах [8,9]. Полученные образцы направляли на комплексное исследование структурных, морфологических и элементных характеристик методами XRD, SEM/EDS [4]. Такой набор методик обеспечивает согласованный структурно-морфологический анализ и позволяет установить влияние условий высокотемпературной диффузии на формирование фаз и микроструктуры поверхности.

Высокотемпературная диффузия Mn в замкнутом объеме при 1100 °C приводит к формированию устойчивого двухкомпонентного приповерхностного слоя Mn_5Si_3–B_6Si, определяющего дальнейшие морфологические и электрофизические особенности модифицированного кремния КДБ-3. Описанная методика высокотемпературной диффузии формирует исходные условия

фазового состава и микроструктуры приповерхностного слоя. В следующем разделе рассматриваются результаты XRD, позволяющие количественно подтвердить образование фаз Mn_5Si_3 и B_6Si и связать их появление с условиями обработки.

2.2. Рентгенофазовый анализ (XRD)

Рентгенодифракционные исследования модифицированного образца КДБ-3 выполнены методом $\theta-2\theta$-сканирования на дифрактометре Shimadzu (Cu$K\alpha$, $\lambda = 1.5406$ Å) в диапазоне $2\theta = 5-70°$, шаг $0.050°$, скорость $2\,°$/мин. Первичная обработка рентгенодифракционных данных.

2.2.1. Общая картина дифракционной структуры

На экспериментальной дифрактограмме (рис. 2) наблюдается: система интенсивных рефлексов кристаллического кремния подложки, серия широких низкоинтенсивных максимумов силицидов Mn–Si, выраженный аморфный фон в низкоугловой области. Появление аморфной компоненты и уширение рефлексов связано с высокотемпературной диффузией марганца при 1100 °C, сопровождающейся частичным разрушением исходной кристалличности верхнего слоя Si [1,2].

Фазовая идентификация и количественный анализ выявили наличие двух основных фаз: B_6Si — 87.3 %, Mn_5Si_3 — 12.7 %. Фазовые диаграммы составов приведены на рис. 3. Соотношение Mn_5Si_3/B_6Si согласуется с современными данными о стабильности силицидов в системе Mn–Si и тенденциями сегрегации Mn вблизи поверхности кремния при температурах ~ 1100 °C [10]. Наличие слабодифракционных максимумов Mn–Si-соединений подтверждается результатами других исследований по структурированию Mn_5Si_3 в тонкопленочных и высокотемпературно-обработанных системах [11].

2.2.2. Степень кристалличности и аморфность

Степень кристалличности составляют: DOC = 23.59 %, аморфная составляющая ≈ 76.41 %. Высокий аморфный вклад является ожидаемым результатом диффузии Mn в Si и последующего быстрого охлаждения, приводящего к стабилизации разупорядоченной структуры [12]. Подобные уровни DOC характерны для сильно модифицированных кремниевых слоев после высокотемпературных циклов, что наблюдается и в других Si-системах с примесями переходных металлов.

2.2.3. Параметры дифракционных максимумов

Положение и параметры основных пиков приведены в табл. 2. Наиболее интенсивные рефлексы: $2\theta = 43.807$, 37.582, 64.168° соответствуют характерным отражениям фаз Mn_5Si_3 и B_6Si, что согласуется с литературными

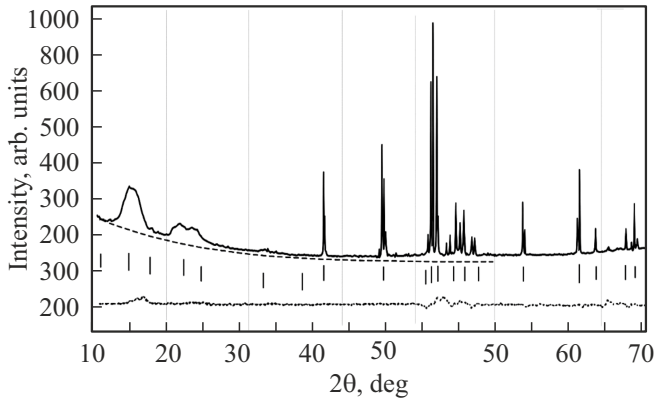

Рис. 2. Рентгеновский профиль образца КДБ-3: экспериментальная дифрактограмма (сплошная линия), расчетные положения рефлексов фаз B_6Si и Mn_5Si_3 (короткие вертикальные штрихи), аппроксимированный фон (штриховая линия), кривая разности „эксперимент–модель RIR“ (пунктирная линия).

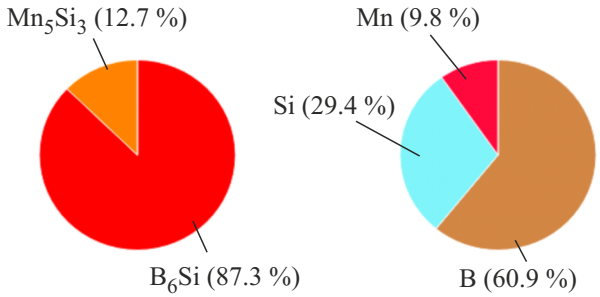

Рис. 3. Фазовый (слева) и элементный (справа) составы диффузионного слоя образца КДБ-3.

данными по симметрии и межплоскостным расстояниям этих соединений [11].

Относительно низкая интенсивность Si-рефлексов (области 47.4 и 56.2°) подтверждает частичную деградацию кристаллического Si-подложечного слоя после диффузии Mn [2].

2.2.4. Локальный анализ области 35–44°

Фрагмент дифрактограммы в диапазоне 35–44° (рис. 4) содержит пять отчетливых максимумов, два из которых — при 37.582 и 43.807° — принадлежат Mn_5Si_3 (табл. 3). Остальные пики имеют форму и ширину, характерные для мелкодисперсных силицидов, что указывает на неоднородность распределения Mn-содержащих фаз.

Отсутствие интенсивных Si-рефлексов в этом диапазоне подтверждает аморфизацию поверхностного слоя.

2.2.5. Оценка размера кристаллитов Mn_5Si_3 методом Шеррера

Экспериментальные ширины FWHM рефлексов Mn_5Si_3 близки к инструментальному разрешению

Таблица 2. Параметры дифракционных максимумов образца КДБ-3

№ пика	2θ, град.	d, Å	I/I_o, %	FWHM, град.	Интенсивность	Интегральная интенсивность
1	9.031	9.7883	132.66	1.3000	1855.74	13715
2	13.432	6.5853	54.68	1.4000	823.70	–
3	37.582	2.3918	381.02	0.2000	819.98	12855
4	43.372	2.0849	68.56	0.5000	368.85	4121
5	43.807	2.0649	1000.00	0.2500	5951	30717
6	47.418	1.9157	92.54	0.2000	199.16	3250
7	48.012	1.8933	71.31	0.2000	153.47	2638
8	50.485	1.8061	53.36	0.2500	143.54	2137
9	56.195	1.6353	133.51	0.3000	430.97	5332
10	64.168	1.4500	133.51	0.2500	2402	12553

Таблица 3. Оценка размеров кристаллитов Mn_5Si_3 методом Шеррера

2θ, град.	FWH_{meas}, град.	β_{inst}, град.	β_{corr}, град.	D, нм
37.5823	0.23390	0.22770	0.0326	≈ 30
43.8074	0.23370	0.22770	0.0317	≈ 28

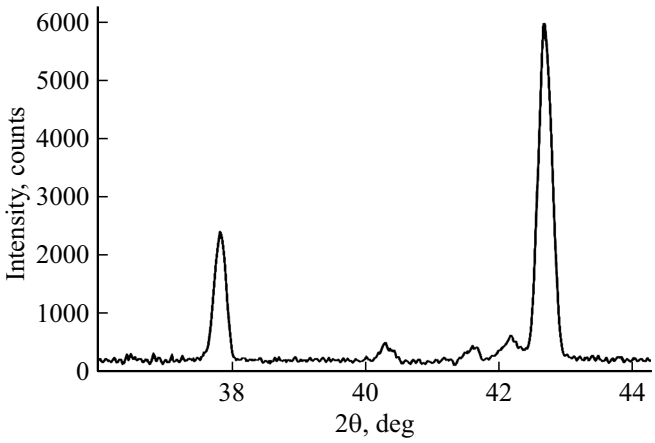

Рис. 4. Фрагмент дифракционной картины ($35-44^\circ$, 2θ).

дифрактометра. При $\beta_{corr} < 0.04^\circ$ формула Шеррера теряет чувствительность, а рассчитанные размеры кристаллитов становятся неопределенными (режим instrument-limited). Такое поведение характерно для крупнокристаллических включений Mn_5Si_3 ($\gg 100$ нм), формирующихся при высокотемпературной диффузии и медленном достижении равновесного состава фаз [3,4]. Инструментальная составляющая уширения принята равной $\beta_{inst} = 0.2277^\circ$, что соответствует наиболее узкому кремниевому рефлексу при $2\theta = 47.418^\circ$. Коррекция экспериментального уширения выполнялась по выражению:

$$\beta_{corr} = \sqrt{\beta_{meas}^2} - \beta_{inst}^2.$$

Расчет размера кристаллитов осуществлялся по формуле Шеррера:

$$D = \frac{K\lambda}{\beta_{corr}\cos\theta}, \ K = 0.9, \ \lambda = 1.5406\,\text{Å}, \ \theta = \frac{1}{2}2\theta.$$

Структура диффузионного слоя, выявленная методом XRD, характеризуется устойчивой комбинацией фаз $Mn_5Si_3-B_6Si$, высокой степенью аморфизации и крупными силицидными включениями. XRD-анализ демонстрирует, что высокотемпературная диффузия Mn приводит к формированию фазово-неоднородной, аморфно-кристаллической структуры, где крупные включения Mn_5Si_3 „вморожены“ в аморфную матрицу B_6Si-Si, что определяет ключевые морфологические и электрофизические свойства модифицированного кремния КДБ-3. Полученные структурные данные устанавливают основу для интерпретации морфологических особенностей поверхностного слоя и их влияния на электротранспорт, что рассмотрено в следующем разделе.

2.3. Морфология поверхности образца КДБ-3

Морфология поверхности модифицированного слоя кремния КДБ-3 исследована методом сканирующей электронной микроскопии на установке JEOL JSM-IT210 при ускоряющем напряжении 10 кВ. Для обеспечения стабильной зарядовой проводимости применено углеродное напыление в системе JEOL JEC-3000FC. Анализ выполнен по серии изображений с увеличениями от $\times 100$ до $\times 2700$, что позволяет проследить структуру рельефа в широком диапазоне масштабов (рис. 5, *a–e*).

На низких увеличениях $\times 100-270$ (рис. 5, *a, b*) поверхность демонстрирует выраженную крупномасштабную неоднородность. Обнаруживаются разупорядоченные макрообласти размером $\sim 50-200$ мкм, разделенные бороздами и углублениями, что отражает значительную переработку поверхностного слоя при высокотемпературном воздействии. Мозаичное распределение участков различной плотности связано с неравномерным поступлением и локальной сегрегацией марганца в процессе диффузии. При увеличениях $\times 550-1000$

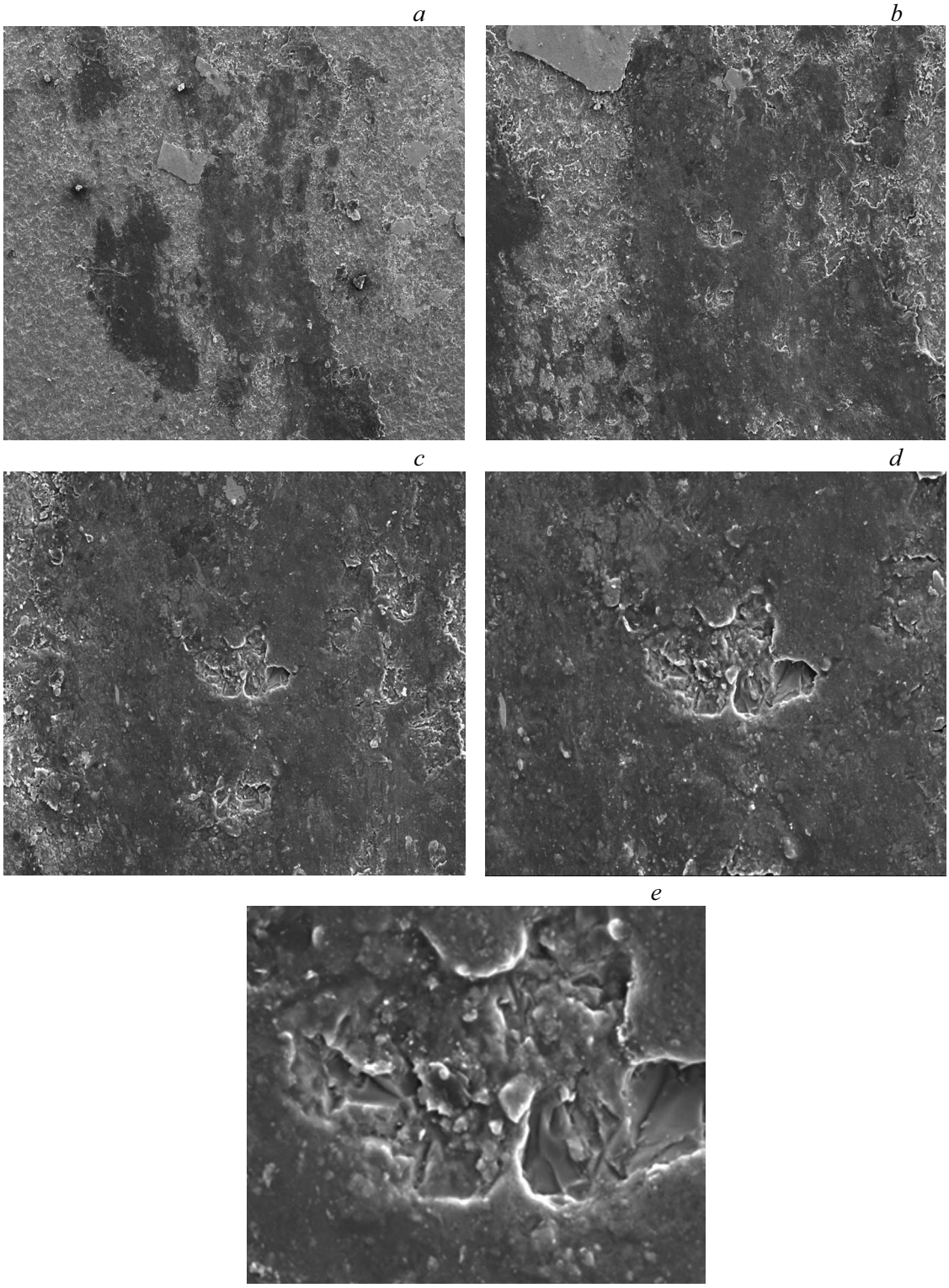

Рис. 5. SEM-изображения поверхности образца КДБ-3 после высокотемпературной диффузии Mn.

(рис. 5, *c, d*) проявляется развитая микроструктура, представленная агрегатами неправильной формы размерами 3–10 мкм. Их границы неровные и частично фрагментированы, что указывает на конкурирующие процессы роста, разрушения и перераспределения материала. Межагрегатные области содержат субмикронные частицы размером 200–500 нм, формирующие переходный слой между крупными и мелкими морфологическими образованиями. Максимальное увеличение ×2700 (рис. 5, *e*) выявляет сложный нанорельеф. На фоне

слабоупорядоченной матрицы наблюдаются вытянутые пластинчатые элементы длиной 0.5–2.5 мкм и шириной до нескольких сот нанометров, а также плотные скопления нанозерен размером 80–300 нм. Наличие одновременно пластинчатых и зернистых морфологических компонентов указывает на многостадийный характер структурной перестройки приповерхностного слоя во время высокотемпературной диффузии марганца. Таким образом, поверхность диффузионно-модифицированного образца КДБ-3 характеризуется иерархически организованным полимасштабным рельефом, включающим: крупные разупорядоченные области (десятки–сотни микрометров), микрометровые фрагменты неправильной формы (3–10 мкм), субмикронную зернистую компоненту (200–500 нм), наноструктурированные пластинчатые и зернистые элементы (80–300 нм). Такая многоуровневая морфология согласуется со структурными результатами XRD (разд. 2.2), отражая комбинированное влияние фаз Mn_5Si_3–B_6Si и высокую степень аморфизации на формирование поверхностного рельефа. Полученные данные указывают на сложную термически индуцированную перестройку материала при диффузии марганца, определяющую дальнейшие электрофизические свойства модифицированного кремния.

Иерархический характер морфологии, выявленный методом SEM, согласуется с фазово-структурными особенностями, установленными XRD-анализом. Такая согласованная картина определяет предпосылки для анализа электрофизических свойств диффузионно модифицированного слоя кремния КДБ-3.

3. Электрофизические характеристики системы Si:Mn

Электрофизические свойства модифицированного кремния КДБ-3 определяются совокупностью структурных факторов, сформированных в процессе высокотемпературной диффузии марганца. Рентгенофазовый анализ выявил образование двухфазной силицидной структуры Mn_5Si_3–B_6Si при высокой степени аморфизации приповерхностного слоя ($\approx 76\,\%$), а морфологические исследования показали наличие крупнодисперсных силицидных включений и развитой нанорельефной компоненты. Такое сочетание фаз и морфологических элементов формирует неоднородную проводящую среду, оказывающую определяющее влияние на характер токопереноса [13].

Измерения в продольной геометрии при приложении магнитного поля $B = 0.14$ Тл позволили получить значения холловского напряжения $U_{\delta 1} = 896$ мВ и $U_{\delta 2} = 953$ мВ. Среднее значение $U_{\delta,\,\mathrm{ave}} = 924.5$ мВ использовано для расчета транспортных параметров при средних токах $I_{\mathrm{ave}} = 0.0405$ мА. На основе геометрии образца (толщина $W = 0.8$ мм, ширина $d = 3.5$ мм) определено продольное сопротивление $R_{xx} \approx 1.4 \cdot 10^5$ Ом, а удельное сопротивление приповерхностного слоя составляет $\rho \approx 2.3 \cdot 10^3$ Ом · см. Концентрация носителей заряда $n \approx 4.5 \cdot 10^{13}\,\mathrm{см}^{-3}$ и подвижность $\mu \approx 60\,\mathrm{см}^2/(\mathrm{В} \cdot \mathrm{с})$ значительно отличаются от исходных параметров кремния КДБ-3, что связано с перераспределением марганца и формированием сочетания аморфной матрицы и силицидных кластеров. Проводящие участки Mn_5Si_3 образуют локальные каналы повышенной проводимости в более слабопроводящей матрице B_6Si–Si. Их пространственно-фрагментированное распределение формируют сеть межфазных границ и локализованных потенциальных барьеров, которые приводят к пространственно неоднородному характеру токопереноса и способствуют развитию межфазной поляризации [14]. Наличие нанозернистых и пластинчатых элементов дополнительно увеличивает эффективную площадь межфазных поверхностей, усиливая роль ловушек и локализованных состояний. Увеличившаяся доля аморфной компоненты способствует снижению подвижности носителей и росту удельного сопротивления. Полученные структурные особенности фазы Mn_5Si_3 согласуются с современными данными о нестехиометрии и вторичных фазовых отношениях в системах Mn–Si [15].

Для оценки диффузионных параметров марганца использовано стандартное выражение $D = D_0 \times \exp(-E_a/kT)$, где температура $T = 1100\,^\circ\mathrm{C}$ соответствует условиям диффузионной обработки. Оценочная диффузионная длина $X = 2\sqrt{(Dt)}$ согласуется с формированием силицидного слоя толщиной в несколько микрометров, установленным по структурным данным. В совокупности результаты электрофизических измерений показывают, что транспорт в системе Si:Mn определяется конкуренцией между проводящими зонами Mn_5Si_3 и высокоразупорядоченной B_6Si–Si-матрицей. Эта структурно-фазовая архитектура формирует сложный неоднородный электротранспорт, который напрямую связан с морфологическими особенностями приповерхностного слоя, выявленными в разд. 2.2–2.3. Полученные электротранспортные параметры, рассмотренные совместно с фазовым и морфологическим анализом, подтверждают ключевую роль высокотемпературной диффузии марганца в формировании многослойной структуры Mn_5Si_3–B_6Si–Si, определяющей функциональные свойства модифицированного кремния КДБ-3. Эти результаты служат основой для обобщающих выводов исследования.

4. Заключение

Высокотемпературная диффузия марганца в кремний КДБ-3 приводит к формированию сложной многокомпонентной структуры приповерхностного слоя, включающей фазы Mn_5Si_3 и B_6Si, а также значительный аморфный вклад. Рентгеноструктурный анализ показывает, что такая конфигурация сопровождается уменьшением степени кристалличности и появлением широких дифракционных максимумов силицидных соединений. Морфологические исследования подтверждают наличие полимасштабного рельефа с совокупностью макро-, микро- и

наноструктурированных элементов, связанных с неравномерным протеканием процессов силициообразования и аморфизации.

Электрофизические измерения выявили существенное увеличение удельного сопротивления и снижение подвижности носителей заряда, что связано с формированием неоднородной проводящей среды, состоящей из локальных участков Mn_5Si_3, встроенных в менее проводящую B_6Si–Si-матрицу. Пространственное распределение силицидных включений и развитая система межфазных границ определяют неоднородный характер токопереноса и повышенную роль локализованных состояний.

Совокупность структурных, морфологических и транспортных данных демонстрирует взаимосвязанное влияние фазового состава, аморфизации и распределения силицидных включений на формирование электрофизических свойств системы Si:Mn. Полученные результаты уточняют механизм модификации кремния марганцем при высокотемпературной диффузии и могут служить основой для разработки функциональных материалов на базе силицидов переходных металлов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] M.K. Bakhadyrkhanov, Kh.M. Iliev, M.O. Tursunov, S.B. Isamov, S.V. Koveshnikov, M.K. Madjitov. Inorg. Mater., **57**, 655 (2021). DOI: 10.1134/S0020168521070027

[2] N.F. Zikrillayev, M.M. Shoabdurahimova, T. Kamilov, A.Z. Khusanov, K.K. Kurbonaliev, N. Norkulov, E.B. Saitov. Phys. Sci. Technol., **9**, 89 (2022). DOI: 10.1109/PST55267.2022.00020

[3] H. Li, D. Niu, Z. Zhang, F. Yang, H. Wang, W. Cheng. Materials, **16**, 3540 (2023). DOI: 10.3390/ma16103540

[4] I. Kounta, H. Reichlová, D. Kriegner, X. Marti, T. Jungwirth, J. Kuneš. Phys. Rev. Mater., **7**, 024416 (2023). DOI: 10.1103/PhysRevMaterials.7.024416

[5] Д.И. Рогило, С.В. Ситников, Е.Е. Родякина, А.А. Шкляев. Кристаллография, **66**, 528 (2021). DOI: 10.31857/S0023476121060101

[6] J. Rial, A. Bhowmik, I. Kezsmarki, D. Kriegner, H. Reichlová, X. Marti. Phys. Rev. B, **110**, L220411 (2024). DOI: 10.1103/PhysRevB.10.L220411

[7] Х.Ф. Зикриллаев, К.С. Аюпов, Г.Х. Мавлонов, Ф.Х. Каримов. ФТП, **56**, 528 (2022). DOI: 10.21883/FTP.2022.06.52664.9760

[8] W. Kern. J. Electrochem. Soc., **137**, 1887 (1990). DOI: 10.21883/FTP.2022.06.52664.9760

[9] M. Hortamani, V.G. Ruiz, A. Qadeer, P. Kratzer, M. Scheffler. Phys. Rev. B, **74**, 205305 (2006). DOI: 10.1103/PhysRevB.74.205305

[10] N.S. Chauhan, S.G. Sara, A. Bhattacharya, T. Mori, Y. Miyazaki. Adv. Funct. Mater., **34**, 2313948 (2024). DOI: 10.1002/adfm.202313948

[11] S.-H. Kim, J.-H. Park, J.-K. Lee. Appl. Surf. Sci., **622**, 156821 (2023). https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2023.156821

[12] H. Reichlová, R.L. Seeger, R. González-Hernández, I. Kounta, R. Schlitz, D. Kriegner, P. Ritzinger, M. Lammel, M. Leiviskä, A.B. Hellenes, K. Olejník, V. Petříçek, P. Doležal, L. Horák, E. Schmoranzerová, A. Badura, S. Bertaina, A. Thomas, V. Baltz, L. Michez, J. Sinova, S.T.B. Goennenwein, T. Jungwirth, L. Šmejkal. Nature Commun., **15**, 4961 (2024). https://doi.org/10.1038/s41467-024-48493-w

[13] D. Senk, G. Borchardt. Microchim. Acta, **80**, 477 (1983). https://doi.org/10.1007/BF01200866

[14] X. Wu, Y. Wu, R. Li, Q. Zhang, Z. Chen, L. Wang, J. Liu. J. Appl. Phys., **132**, 035103 (2022). DOI: 10.1016/j.mssp.2023.107593

[15] T. Kim, S. Lee, K. Kim. Mater. Sci. Semicond. Process., **158**, 107593 (2023). DOI: 10.1002/adfm.202313948

Редактор Г.А. Оганесян

High-temperature manganese diffusion into KDB-3 silicon: formation of Mn_5Si_3 and B_6Si phases, morphology and electrophysical properties

N.F. Zikrillaev[1], S.O. Saidov[2], N.Yu. Sharibaev[3], G.Kh. Mavlonov[1], Y.A. Abduganiev[1], E.S. Nazarov[2], I.O. Kosimov[4], A.K. Ergashev[3]

[1] Tashkent State Technical University
named after Islam Karimov,
100095 Tashkent, Uzbekistan
[2] Bukhara State University,
200118 Bukhara, Uzbekistan
[3] Namangan State Institute
of Engineering and Technology,
160103 Namangan, Uzbekistan
[4] A. Sadykov Institute of Bioorganic Chemistry,
100125 Tashkent, Uzbekistan

Abstract The formation of structural, phase and electrophysical properties of KDB-3 silicon after high-temperature manganese diffusion at 1100 °C in a sealed ampoule is investigated. *X*-ray phase analysis shows the formation of a surface two-phase layer containing intermetallic Mn_5Si_3 and borosilicide B_6Si, with a high fraction of amorphous component. Scanning electron microscopy reveals a pronounced multi-scale relief comprising macro-, micro- and nanostructured elements that reflect heterogeneous material redistribution during diffusion. Electrophysical measurements demonstrate a significant increase in resistivity, reduction of carrier mobility and decrease in carrier concentration, which are attributed to the combined effect of the amorphous matrix and distributed silicide inclusions. The results establish clear links between phase composition, morphology and charge transport in Si:Mn and clarify mechanisms governing the functional properties of modified KDB-3 silicon.