

Фотоэлементы на основе кремния с бинарными соединениями $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$

Н. Ф. Зикриллаев^a, Х. Ф. Зикриллаев^a, Ф. Э. Уракова^{a,*}, Г. А. Кушиев^a,
Э. Б. Саитов^b, Д. М. Шукурова^a, Б. Х. Ибрагимова^a

^aТашкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова,
г. Ташкент, 100095, Узбекистан

^bТашкентский университет прикладных наук, г. Ташкент, 100185, Узбекистан
*e-mail: feruzaxonurakova@gmail.com

Поступила в редакцию 31.05.2024

После доработки 05.12.2024

Принята к публикации 09.12.2024

Приведены результаты исследования фотоэлектрических свойств кремния с бинарными соединениями $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$. Определены термодинамические условия ($T = 1100 \div 1250$ °С и $t = 5 \div 20$ ч) и технологические режимы низкотемпературной двухэтапной диффузии примесных атомов германия, которые позволили получить материал с бинарными соединениями $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ на поверхности и в приповерхностном слое кремния с заданными электрофизическими параметрами. Из результатов исследования концентрационного распределения образованных бинарных соединений $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ в кремнии установлено, что на поверхности формируются соединения с максимальной концентрацией и с углублением в объем кремния их концентрация уменьшается. Установлено, что образованные соединения $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ в кремнии приводят к изменению ширины запрещенной зоны исходного материала. Показано, что изменение ширины запрещенной зоны исходного кремния за счет образования бинарных соединений $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ изменяет один из фундаментальных параметров материала, который, в свою очередь, приводит к расширению спектральной области чувствительности, что характерно при разработке эффективных фотоэлементов с широким диапазоном поглощения солнечного излучения.

Ключевые слова: германий, кремний, соединение, диффузия, проводимость, концентрация, технология

УДК 621.315.592

<https://doi.org/10.52577/eom.2024.60.6.32>

ВВЕДЕНИЕ

Потребность в полупроводниковых материалах и приборах на их основе растет с развитием микроэлектроники и наноэлектроники, продукты которых широко используются во всех отраслях науки и техники. В последние годы ученые и специалисты уделяют особое внимание развитию направления физики полупроводников, в частности получению недорогих полупроводниковых материалов. В этом плане кремний, легированный примесными атомами германия, является перспективным материалом для решения этой проблемы, то есть позволяет получить материалы, отвечающие требованиям оптоэлектроники и фотоэнергетики. Из литературных данных известно, что для изготовления современных приборов, в частности, эффективных фотоэлементов требуется упростить сложные технологические процессы, что приведет к снижению себестоимости получаемых продуктов. На основе анализов установлено, что в кремнии, легированном различными примесными атомами, такими как Ni, Mn, Cr, Se,

S, Ga, Eu, и другими полупроводниковыми бинарными соединениями, был обнаружен ряд новых физических свойств, которые успешно реализованы на практике [1–6].

Механизмы диффузии разных примесных атомов в кремнии и их состояние в кристаллической решетке, влияние на электрические параметры исходного кремния, условия образования различных соединений и кластеров, а также физические механизмы образования нанокластеров исследованы многими авторами [7–10].

Получение бинарных соединений примесных атомов германия в решетке кремния позволяет существенно расширить спектральную область чувствительности фотоприемников и солнечных элементов на их основе. Бинарные соединения типа $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ могут быть получены на основе монокристаллического кремния методом диффузии примесных атомов германия из газовой фазы. Из литературных данных также известно, что максимальная растворимость атомов германия в кремнии достигает $\sim 10^{22}$ ат/см³ при температуре $T = 1430$ °С. При таких условиях твердые растворы бинарных

соединений $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ были получены из жидкой фазы [11].

МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИЯ

Для получения образцов кремния, легированного примесными атомами германия, была разработана технология двухэтапной диффузии, которая позволила заметно увеличить коэффициенты диффузии примесных атомов в кремнии [12–14].

Известно, что диффузия в полупроводниках происходит в основном за счет взаимодействия диффундирующих примесных атомов с основными атомами и точечными дефектами в кристаллической решетке исходного материала. Газофазный механизм диффузии примесных атомов в полупроводниках по законам Фика. Однако этот механизм диффузии примесных атомов по закону Фика часто не могут полностью описать физические механизмы диффузии в полупроводниках.

Для диффузии примесных атомов германия был использован исходный монокристаллический кремний марки КЭФ-100, в котором исходная концентрация фосфора была равна $N_p \approx 5 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Такая концентрация атомов фосфора практически не влияет на физические свойства образованных бинарных соединений $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ из-за большой растворимости примесных атомов германия в кремнии. При диффузии примесных атомов германия был использован порошкообразный германий с чистотой 99,999%.

Суть разработанной низкотемпературной диффузии заключается в следующем. Исследуемые образцы кремния с примесными атомами германия в виде порошка помещались в кварцевые ампулы, после чего был откачен воздух до вакуума до $P \sim 10^{-6}$ мм рт. ст. Подготовленные ампулы помещались в диффузионную электрическую печь при комнатной температуре ($T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$). Температура печи с кварцевыми ампулами постепенно поднималась до температуры первой стадии диффузии, которая находится в интервале $T = (900 \div 950)^\circ\text{C}$, и кварцевые ампулы выдерживались при этой температуре в течении $t = 30$ мин. Затем температура печи поднималась до температуры $T = 1100 \div 1250 \text{ }^\circ\text{C}$ со скоростью $5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$, и при этой температуре образцы выдерживались $t = 5 \div 20$ час, после чего кварцевые ампулы с образцами кремния охлаждались со скоростью $200 \text{ }^\circ\text{C}/\text{сек}$ сбрасыванием в холодную воду.

По разработанной технологии больше десятка раз осуществлялась диффузия примесных атомов германия в кремнии. После диффузии поверхность полученных образцов исследовали в электронном сканирующем микроскопе марки

Jeol super probe JXA-8800 R/RL. Результаты исследования показали, что в отличие от образцов кремния, легированного традиционным методом диффузии, в образцах, полученных по разработанной двухэтапной диффузионной технологии, не происходила эрозия поверхности, а образования силицидов германия на поверхности кремния уменьшались до минимума. Однако выбранный интервал температур, величина коэффициента диффузии примесных атомов германия относительно низкие и требуют большего времени диффузии. Поэтому для исследования мы ограничились рассмотрением поверхностных и приповерхностных слоев кремния, легированного примесными атомами германия.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Измерения удельного сопротивления образцов кремния, легированного примесными атомами германия, проводились на установке Ван дер Пау марки Escoria HMS-3000 Hall Measurement System после механического удаления и химического очищения поверхностного слоя кремния до $0,5 \text{ мкм}$ со всех сторон полученных образцов параллелепипедной формы.

Из результатов исследования следует, что концентрация примесных атомов германия на поверхности кремния составляет порядка $N_{\text{Ge}} = 4 \times 10^{21} \text{ см}^{-3}$ и на глубине $x = 10 \div 12 \text{ мкм}$ уменьшается до $\sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (рис. 1). Эти результаты исследования полностью соответствует литературным данным [15, 16]. Снятие поверхностного слоя осуществлялось методом химического травления образцов кремния по толщине с шагом $0,5 \text{ мкм}$. Толщина образцов после каждого травления измерялась на электронном микрометре (точность электронного микрометра составляла $0,05 \text{ мкм}$).

Поверхностное состояние образцов кремния, легированного примесными атомами германия, исследовалось электронным сканирующим микроскопом марки Jeol super probe JXA-8800 R/RL в режиме регистрации германия. Анализ экспериментальных результатов (рис. 2а) показал, что на поверхности кремния образуется тонкий слой ($\sim 0,5 \text{ мкм}$), в котором содержится $\sim 27\%$ атомов германия, то есть образованные бинарные соединения имеют следующий состав: $\text{Ge}_{0,27}\text{Si}_{0,73}$, после этого слоя доля примесных атомов германия, участвующих в образовании бинарных соединений, монотонно уменьшается. На глубине порядка $x \sim 5 \text{ мкм}$ образцы кремния имеют состав $\text{Ge}_{0,05}\text{Si}_{0,95}$. Таким образом, установлено, что с помощью двухэтапной диффузионной технологии можно получить соединения $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, которые в свою очередь

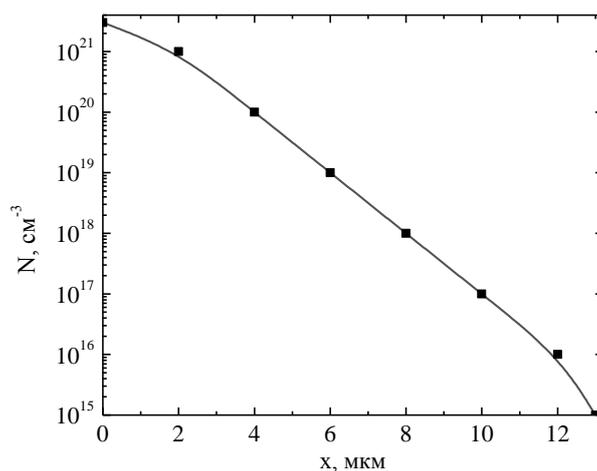


Рис. 1. Распределение по глубине концентрации примесных атомов германия в кремнии.

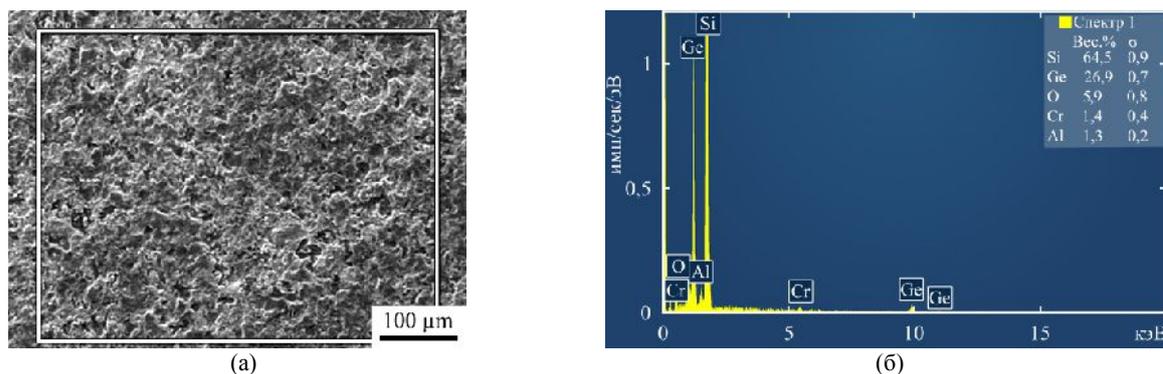


Рис. 2. Топология поверхности образцов кремния после легирования примесными атомами германия, полученная на микроскопе марки Jeol super probe JXA-8800 R/RL (а), спектр рентгеновского энергодисперсионного микроанализа, полученный на установке марки Mira Tescan (б).

Таблица 1. Элементный состав кремния, диффузионно-легированного примесными атомами германия

Элемент	Вес.%	Сигма вес. %
O	5,93	0,76
Al	1,30	0,24
Si	64,46	0,86
Cr	1,41	0,40
Ge	26,90	0,69
Сумма:	100,00	

позволяют получить микрогетероваризонные переходы в кремнии [17, 18].

По результатам исследования элементного состава поверхности образцов кремния на установке рентгеновского энергодисперсионного микроанализатора марки Mira Tescan (рис. 2б), принцип работы которого описан в работе [19], установлено, что атомы кремния на поверхности составляют ~ 64,5%. При этом концентрация атомов германия составляет ~ 26,9%, концентрация кислорода ~ 5,9% и других элементов ~ 2,7% соответственно (табл. 1). Эти исследования также показывают, что на поверхности и в приповерхностных слоях кремния максимальную концентрацию примесных атомов германия, которая участвует в образовании бинарных соединений Ge_xSi_{1-x} , можно довести до ~ 27% при определенных термодинамических условиях диффузии.

Из анализа полученных результатов исследования следует, что количество на поверхности и в приповерхностном слое кремния образованных бинарных соединений Ge_xSi_{1-x} с максимальной концентрацией составляет до ~ 0,5 мкм.

Присутствие атомов кислорода и других неконтролируемых примесных атомов, показанных в табл. 1, можно объяснить тем, что для исследования был использован исходный монокристаллический кремний, выращенный методом Чохральского, в котором содержание остаточного кислорода составляет порядка $N_o \approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$, а также содержится определенная концентрация неконтролируемых дефектов. В условиях диффузии примесных атомов германия атомы кислорода, имеющие дефекты, из-за высокой температуры могут перемещаться из объема на поверхность кремния, что приводит



Рис. 3. Образование химической связи атомов кремния примесным атомом германия (а), штрихом показано образование соединения $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ и нейтрально молекулярного соединения $\text{Si}_2\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$; элементарная ячейка нейтрально-молекулярного соединения типа $\text{Si}_2\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ (б).

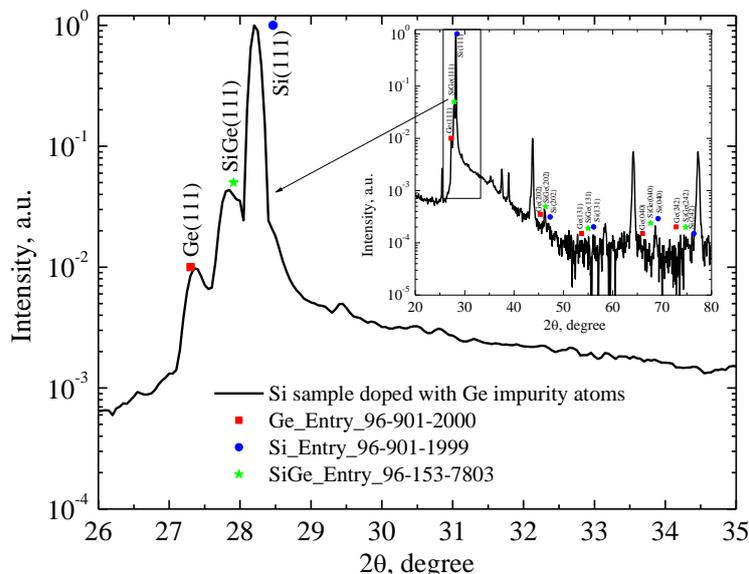


Рис. 4. Дифрактограмма кремния, диффузионно-легированного примесными атомами германия.

Таблица 2. Анализ дифрактограммы образцов исходного чистого кремния, германия, а также образцов кремния с бинарными соединениями $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$

Элемент	Пик №	2 theta	h	k	l	$d_{hkl}, \text{Å}$	$a_{hkl}, \text{Å}$
Ge	2	27,25	1	1	1	1,39	5,62
	9	37,2	2	2	0	1,24	5,61
	10	54,1	3	1	1	1,17	5,59
	12	68,4	3	1	1	1,08	5,63
Si	3	28,35	1	1	1	1,03	5,39
	7	37,8	1	3	1	1,63	5,42
	8	69,41	0	4	0	1,35	5,41
	11	76,55	3	1	3	1,24	5,42
$\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$	1	25,39	1	1	1	3,16	5,47
	4	29,85	2	0	2	3,201	5,54

к образованию в большом количестве вакансий в кристаллической решетке кремния.

Элементный состав кремния после диффузии примесных атомов германия был изучен на установке рентгеновского энергодисперсионного микроанализатора марки Mira Tescan. Из полученных результатов исследования установлено, что величина расстояния между атомами зависит от состава образованных бинарных соединений $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ в кристаллической решетке кремния (рис. 3), которые приводят к изменению электрофизических параметров, не нарушая кристаллической решетки исходного кремния.

$$a_1 \rightarrow a_{\text{Ge}} = 5,62 \text{ Å}$$

$$a_2 \rightarrow a_{\text{Ge}_{0,25}\text{Si}_{0,75}} = 5,47 \text{ Å}$$

$$a_3 \rightarrow a_{\text{Ge}_{0,5}\text{Si}_{0,5}} = 5,541 \text{ Å}$$

$$a_4 \rightarrow a_{\text{Si}} = 5,4255 \text{ Å}$$

Проведены сравнительные анализы полученных дифрактограмм монокристаллического чистого кремния, германия, а также образцов кремния с бинарными соединениями $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ полученных из открытой кристаллографической базы данных COD (рис. 4). В спектрограмме рентгеновских лучей дифрактометра марки Shimadzu XRD-6100, отраженных от

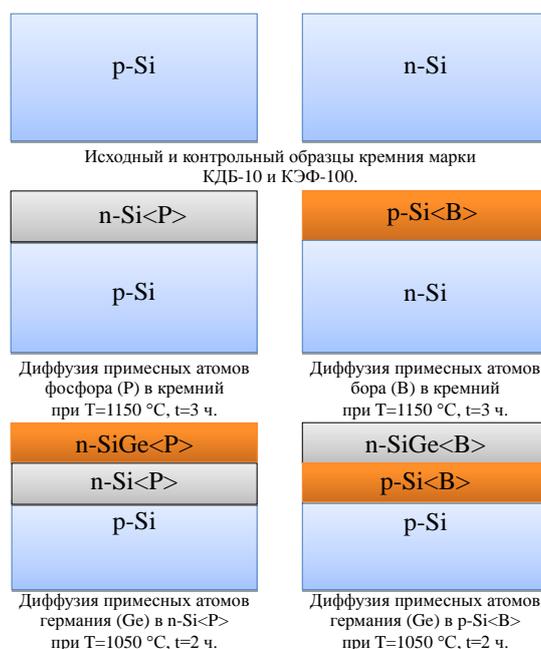


Рис. 5. Технологические режимы получения фотоэлемента с р-n-переходом на основе кремния с гетероваризонной структурой $Ge_xSi_{1-x}Si$.

поверхности образца кремния, легированного примесными атомами германия, сформировалось несколько основных пиков. Линии, соответствующие международной открытой базе данных кристаллографических материалов Ge и Si, были наложены друг на друга для идентификации полученных пиков.

В табл. 2 показаны пики, которые образовались в дифрактограмме в образцах исходного чистого кремния, германия, а также образцах кремния с бинарными соединениями Ge_xSi_{1-x} , и расстояние между двумя атомами: германий–германий, кремний–кремний и германий–кремний.

Спектры дифракции рентгеновских лучей подтверждают образование кремний–германиевых соединений в процессе диффузии и дополнительной термообработки, а также наличие неоднородностей по параметру постоянной решетки исходного кремния.

ОБСУЖДЕНИЕ

Для подтверждения изменения ширины запрещенной зоны исходного кремния после легирования примесными атомами германия был исследован спектр оптического поглощения полученных образцов. Измерение спектров оптического поглощения проводилось на спектрометре марки Lambda 950 UV/Vis/NIR в Институте солнечной энергетики при Эгейском университете (Турция). Спектр излучения спектрометра находился в интервале длины волны $\lambda = 400 \div 2000$ нм ($h\nu = 0,62 \div 3,1$ эВ), и результаты подтверждали, что спектральный ход кремния с бинарными соединениями Ge_xSi_{1-x}

действительно отличается от спектрального хода исходного кремния.

Из результатов исследования следует, что на поверхности и в приповерхностном слое кремния в образованных бинарных соединениях Ge_xSi_{1-x} энергия химической связи между атомами германия и кремния будет отличаться от энергии химической связи между атомами кремния и кремния. Эти результаты показывают, что в кремнии, диффузионно-легированном примесными атомами германия, на поверхности и в приповерхностном слое образуются гетероваризонные микропереходы, которые приводят к расширению спектральной чувствительности фотопроводимости ИК-области излучения.

Также нами проводились теоретические расчеты химических связей с использованием метода теории функционала плотности (DFT). Этот метод позволяет моделировать электронную структуру систем, состоящих из множества частиц, и широко применяется в квантовой физике. Получены расчетные данные расстояния между атомами кремния, германия–германия и кремния–германия, что хорошо согласовывается с экспериментальными данными в спектре дифракции рентгеновских лучей.

Из анализа полученных результатов исследования установлено, что кремний с бинарными соединениями Ge_xSi_{1-x} является перспективным материалом в фотоэнергетике. Чувствительность фотоэлементов, созданных по разработанной нами технологии, расширяется в ИК-области спектра излучения солнца. Расширение спектра поглощения солнечного излучения приводит к

увеличение КПД фотоэлементов на основе кремния с бинарными соединениями $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$. На рис. 5 показана структура предлагаемых фотоэлементов на основе кремния, легированного примесными атомами германия [20–22].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из результатов исследования кремния, диффузионно-легированного примесными атомами германия, установлено, что на поверхности и в приповерхностном слое образцов кремния образовались бинарные соединения $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, концентрацией которых можно управлять технологическими режимами диффузии. В отличие от вышеуказанных различных комбинаций образованных бинарных соединений $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ в кристаллической решетке исходного кремния также могут образоваться нейтрально-молекулярные соединения типа $\text{Si}_2\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ тетраэдрической структуры (рис. 3б), состоящие из трех атомов кремния и одного атома германия. Это означает, что на поверхности и в приповерхностном слое кремния появляется область, обогащенная примесными атомами германия, которая образует $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ бинарные и нейтрально-молекулярные соединения типа $\text{Si}_2\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, не изменяя структуры кристаллической решетки исходного кремния.

Анализ результатов исследования показал возможности изменения одного из фундаментальных параметров ширины запрещенной зоны исходного кремния, которые дают возможность создания фотоприемников и эффективных фотоэлементов, работающих в широком спектре солнечного излучения.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории Узбекско-Японского инновационного центра молодежи и отдельную благодарность академику Академии наук Республики Узбекистан Р.А. Муминову за ценные советы при обсуждении полученных результатов.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

- Adachi, S., *Properties of Group IV, III-V and II-VI Semiconductors*, Chichester: John Wiley & Sons, 2005. 408 p.
- Saidov, A.S., Saparov, D.V., Usmonov, Sh.N., Kutlimratov, A., et al., Investigation of the crystallographic perfection and photoluminescence spectrum of the epitaxial films of $(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{GaP})_x$ solid solution, grown on Si and GaP substrates with the crystallographic orientation (111), *Adv. Condens. Matter Phys.*, 2021, art. ID 3472487. <https://doi.org/10.1155/2021/3472487>
- Pudasaini, P.R. and Ayon, A.A., Low-cost, high-efficiency organic/inorganic hetero-junction hybrid solar cells for next generation photovoltaic devices, *J. Phys.: Conf. Series*, 2013, vol. 476, art. ID 012140. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/476/1/012140>
- Ertler, Ch., Senekowitsch, P., Fabian, J. and Pötz, W., Self-consistent study of transport in Mn-doped semiconductor heterostructures, In: Proc. IEEE 14th Int. Workshop on Computational Electronics, 2010, p. 1. <https://doi.org/10.1109/IWCE.2010.5677992>
- Bakhadyrkhanov, M.K., Isamov, S.B., Kenzhaev, Z.T., Melebaev, D., et al., Silicon photovoltaic cells with deep p–n junction, *Appl. Sol. Energy.*, 2020, vol. 56, no. 1, p. 13. <https://doi.org/10.3103/S0003701X2001003X>
- Утамуратова, Ш.Б., Межрипримесные взаимодействия в кремнии, легированном германием и хромом, *Узб. физич. журнал*, 2017, т. 19, № 4, с. 12.
- Bakhadyrkhanov, M.K., Isamov, S.B., Zikrillayev, N.F., Iliyev, 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>
- Iliyev, X.M., Isamov, S.B., Isakov, B.O., Qurbonova, U.X., et al., A surface study of Si doped simultaneously with Ga and Sb, *East Eur. J. Phys.*, 2023, vol. 3, p. 303. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2023-3-29>
- Astrov, Yu.A., Kozlov, V.A., Lodygin, A.N., Portsel, L.M., et al., Redistribution of deep selenium and sulfur impurities in silicon upon surface doping with phosphorus, *Semiconductors*, 2009, vol. 43, no. 6, p. 710. <https://doi.org/10.1134/S1063782609060049>
- Bakhadyrkhanov, M.K., Mavlyanov, A.Sh., Sodikov, U.Kh., and Khakkulov, M.K., Silicon with binary elementary cells as a novel class of materials for future photoenergetics, *Appl. Sol. Energy*, 2015, vol. 51, no. 4, p. 258. <https://doi.org/10.3103/S0003701X1504009X>
- Saidov, A.S., Kutlimratov, A., Sapaev, B. and Davlatov, U.T., Spectral and current-voltage characteristics of $\text{Si-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ heterostructures grown by liquid phase epitaxy, *Tech. Phys. Lett.*, 2001, vol. 27, no. 4, p. 319. <https://doi.org/10.1134/1.1370213>
- Bakhadyrkhanov, M.K., Mavlonov, G.Kh., Isamov, S.B., Iliyev, 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.org/10.1134/S0020168511050062>
- Бахадирханов, М.К., Абдурахманов, Б.А., Зикриллаев, Х.Ф., О состоянии германия в

- кремнии в условиях низкотемпературной диффузии, *Приборы*, 2018, № 5, с. 39.
14. Aleksandrov, O.V., Simulation of low-temperature arsenic diffusion from a heavily doped silicon layer, *Semiconductors*, 2002, vol. 36, no. 4, p. 370. <https://doi.org/10.1134/1.1469180>
 15. Zikrillayev, N.F., Koveshnikov, S.V., Isamov, S.B., Abdurahmonov, B.A., et al., Spectral dependence of the photoconductivity of $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ type graded-gap structures obtained by diffusion technology, *Semiconductors*, 2022, vol. 56, no. 1, p. 29. <https://doi.org/10.1134/S1063782622020191>
 16. Zikrillayev, N.F., Kushiev, G.A., Koveshnikov, S.V., Abdurakhmanov, B.A., et al., Current status of silicon studies with $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binary compounds and possibilities of their applications in electronics, *East Eur. J. Phys.*, 2023, no. 3, p. 334. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2023-3-34>
 17. Bakhadirkanov, M.K. and Isamov, S.B., Physical foundations of the formation of the silicon-based heterovarizonic structure, *Tech. Phys.*, 2022, vol. 67, no. 14, p. 2211. <https://doi.org/10.21883/TP.2022.14.55220.60-21>
 18. Zikrillayev, N.F., Kushiev, G.A., Hamrokulov, Sh.I. and Abduganiev, Y.A., Optical properties of $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binary compounds in silicon, *J. Nano- Electron. Phys.*, 2023, vol. 15, no. 3, art. ID 03024. [https://doi.org/10.21272/jnep.15\(3\).03024](https://doi.org/10.21272/jnep.15(3).03024)
 19. Yunin, P.A., Drozdov, Yu.N., Drozdov, M.N., Korolev, S.A., et al., Study of multilayered SiGe semiconductor structures by X-ray diffractometry, grazing-incidence X-ray reflectometry, and secondary-ion mass spectrometry, *Semiconductors*, 2013, vol. 47, p. 1556. <http://dx.doi.org/10.1134/S1063782613120221>
 20. Zikrillayev, N.F., Ayupov, K.S., Shoabdurakhimova, 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 Europ. J. Phys.*, 2023, vol. 4, p. 251.
 21. Zikrillayev, N.F., Shoabdurakhimova, M.M., Ayupov, K.S., Urakova, F.E., et al., Self-oscillatory process in silicon, problems and prospects for research, and their application in electronics, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2024, vol. 60, no. 1, p. 75.
 22. Singh, A.K., Tiwari, J., Yadav, A. and Iha, R.K., Analysis of Si/SiGe heterostructure solar cell, *J. Energy*, 2014, art. ID 946406. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/946406>.

Summary

In this paper, the results of the study of photoelectric properties of silicon with binary compounds $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ are presented. The selection of the impurity atom of germanium for introduction into silicon was justified by the fact that those impurities have unlimited solubility and, depending on the technological modes of diffusion, can be located in the nodes or between the nodes of the crystal lattice of silicon. A high solubility of germanium atoms in silicon allows the formation of $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ compounds on the surface and near the surface of silicon. To obtain silicon doped with impurity atoms of germanium, the original monocrystalline silicon of the KEF-100 brand was used. Doping of impurity atoms of germanium into silicon was carried out according to the developed low-temperature two-stage diffusion technology. The results of the studies allowed to determine the thermodynamic conditions ($T = 1100\div 1250$ °C and $t = 5\div 20$ h) and technological modes of low-temperature two-stage diffusion of impurity atoms of germanium, which made it possible to obtain a material with binary compounds $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ on the surface and near-surface of silicon with given electrophysical parameters. From the results of the study of the concentration distribution of the formed binary compounds $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ in silicon, it was established that compounds with the maximum concentration were formed on the surface, and their concentration decreased with depth into the volume of silicon. From the spectrum of the X-ray energy dispersive microanalysis, it was established that the compounds $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ formed in silicon lead to a change in the forbidden zone width of the original material. It is shown that the change in the forbidden zone width of the original silicon due to the formation of binary compounds $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ changes one of the fundamental parameters of the material, which, in turn, leads to an expansion of the spectral region of sensitivity, which is typical in the development of efficient photocells with a wide range of solar radiation absorption.

Keywords: germanium, silicon, compound, diffusion, conductivity, concentration, technology