

# Кремний с бинарными соединениями $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$

Н. Ф. Зикриллаев<sup>a</sup>, К. С. Аюпов<sup>a</sup>, Н. Наркулов<sup>b</sup>, Ф. Э. Уракова<sup>a\*</sup>,  
Г. А. Кушиев<sup>a</sup>, О. С. Неъматов<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Ташкентский государственный технический университет, г. Ташкент, 100095, Узбекистан

<sup>b</sup>Национальный университет Узбекистана, г. Ташкент, 100174, Узбекистан

<sup>c</sup>Самаркандский государственный университет, г. Самарканд, 140104, Узбекистан

\*e-mail: [feruzaxonurakova@gmail.com](mailto:feruzaxonurakova@gmail.com)

Поступила в редакцию 21.07.2023

После доработки 27.03.2024

Принята к публикации 29.03.2024

Приводятся результаты исследований электрофизических, фотоэлектрических и магнитных свойств образцов кремния, диффузионно-легированного примесными атомами германия. Показано, что примесные атомы германия в кремнии образуют бинарные соединения типа  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ , концентрация которых меняется с глубиной исходного кремния. Разработанная диффузионная технология легирования кремния примесными атомами германия позволила получить материал с различными концентрациями примесных атомов германия с удельным сопротивлением и типом проводимости. Определены оптимальные электрофизические параметры и магнитные свойства полученных образцов, что позволило показать возможности создания новых видов датчиков и приборов в полупроводниковой электронике. Проведенные исследования позволяют развивать соответствующее направление в области материаловедения с магнитными свойствами и создавать эффективные фотоэлементы в фотоэнергетике.

*Ключевые слова:* кремний, германий, концентрация, примесь, спин, магниточувствительность, бинарное соединение, диффузия

УДК 621.315.592

<https://doi.org/10.52577/eom.2024.60.2.50>

## ВВЕДЕНИЕ

Электрофизические, фотоэлектрические и магнитные свойства полупроводниковых материалов исследовали многие авторы в различных материалах, таких как элементарные полупроводники кремния и германия, полупроводниковые соединения  $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$  и  $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$ , а также в различных структурах. Бурный интерес ученых и специалистов, изучавших эти свойства, особенно магнитные свойства материалов, вызван тем, что использование спина электронов в полупроводниковом приборостроении имеет определенную перспективу для создания быстродействующих устройств с легким управлением. В этом направлении интенсивно ведутся исследования для интеграции магнитных систем в полупроводниковую микроэлектронику. Легкое управление спинами электронов в магниточувствительных полупроводниковых материалах позволяет создать спин-электронные нанотранзисторы и тонкие пленки гибридных материалов со структурой ферромагнит-полупроводник. Из литературных данных известно, что магнитные свойства обусловлены  $d$ -орбитами электронной оболочки атомов и в этом случае образуются  $s$ - или  $p$ -орбиты. Вследствие этого магнитные свойства атомов в кристаллической решетке полупроводника резко увеличиваются.

Сегодня особое внимание уделяется получению новых видов материалов путем формирования кластеров примесных атомов на поверхности и в объеме кремния, которые приводят к изменению фундаментальных параметров исходного материала [1–6]. Такие исследования относятся к одним из современных и актуальных направлений в области физики полупроводников. Для получения наноразмерных структур примесных атомов в кремнии методами молекулярно-лучевой эпитаксии или ионной имплантации требуются дорогостоящие современные технологические установки и достаточно большие энергетические затраты [7–9]. В этом направлении одной из важных задач является разработка диффузионной технологии формирования наноразмерных бинарных соединений примесных атомов, позволяющей создать не только достаточно большую их концентрацию на поверхности и в объеме кремния, но и получить материал с заданным составом, структурой и электрофизическими параметрами. В связи с этим требуется разработать новые диффузионные методы легирования из газовой фазы для получения бинарных соединений примесных атомов в объеме кремния, в которых наблюдались многие новые интересные физические явления [10–17].

Примесные атомы германия в кремнии могут образовывать бинарные соединения  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ , которые приводят к изменению электрофизических и фотоэлектрических параметров исходного кремния. Выбор примесного атома германия обусловлен тем, что атомы германия могут без ограничения раствориться в кремнии, что дает основу для образования максимальной концентрации бинарных соединений  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  в кристаллической решетке, приводящей к увеличению подвижности носителей заряда относительно исходного кремния, которые позволяют создать быстродействующие электронные устройства, такие как транзисторы, переключатели и датчики.

Из анализа литературных данных установлено, что  $\text{SiGe}$  бинарные сплавы на поверхности кремния приводят к образованию гетероструктур с шириной запрещенной зоны от  $E_g = 0,68$  эВ (для чистого германия) до  $E_g = 1,12$  эВ (для чистого кремния), на основе которых можно создавать эффективные солнечные элементы.

Разработанная воспроизводимая технология позволяет получить образцы кремния с бинарными соединениями  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  для исследования электрофизических, фотоэлектрических и магнитных свойств.

Полученные методом диффузионного легирования примесных атомов германия на поверхности и приповерхностной области кремния бинарные соединения  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  занимают особое место в электронике для создания быстродействующих приборов с новыми функциональными возможностями и эффективными фотоэлементами.

## МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИЯ

Диффузионная технология получения  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  бинарных соединений в кремнии требует достаточно длительного времени, так как коэффициент диффузии примесных атомов германия в кремнии невелик ( $D \sim 10^{-14}$  см<sup>2</sup>/с) [18, 19].

Диффузия примесных атомов германия проводилась в кварцевых ампулах откаченного вакуума в пределе  $P = 10^{-5} - 10^{-6}$  мм рт. ст. После этого по разработанной двухэтапной диффузионной технологии производилась диффузия примесных атомов германия в кремнии. Двухэтапная диффузионная технология позволяет получить материал с максимальной концентрацией примесных атомов германия в кремнии, которая находится в узлах кристаллической решетки [20].

На первом этапе диффузии кварцевые ампулы помещались в реактор электрической печи марки Magnetic NG17-60/300, после этого электрическая печь подключалась к сети и температура

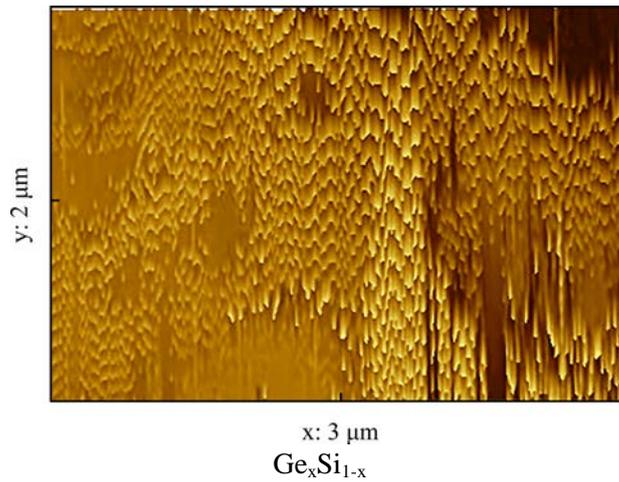
реактора постепенно поднималась до  $T = 650$  °С, при этой температуре кварцевые ампулы удерживались в течение  $t = 30$  мин. На следующем этапе температура реактора электрической печи поднималась до температуры диффузии  $T_D$  ( $T \geq 1100$  °С) и удерживалась определенное время. Температура и время диффузии определялись на основе теоретических расчетов, которые позволили получить образцы кремния, легированного примесными атомами германия, с нужными электрофизическими параметрами. После диффузии кварцевые ампулы охлаждались опусканием в холодную воду, а образцы кремния после диффузии подвергались механической шлифовке и химическому травлению в растворе  $\text{HNO}_3 + \text{HF} + \text{CH}_3\text{COOH}$  уксусная кислота для очищения от технологических дефектов и образованного оксидного слоя  $\text{SiO}_2$ . В очищенных образцах измерялись электрофизические параметры кремния, легированного примесными атомами германия, четырехзондовым методом и методом измерения эффекта Холла на установке Ван-дер-Пау марки Escoria HMS-3000.

Магнитно-силовая микроскопия (МСМ) является эффективным средством исследований магнитных структур на субмикронном уровне. Полученные с помощью МСМ изображения позволяют определить пространственное распределение параметров, которые характеризуют магнитное взаимодействие зонд-образец, например, силу взаимодействия, амплитуду колебаний магнитного зонда.

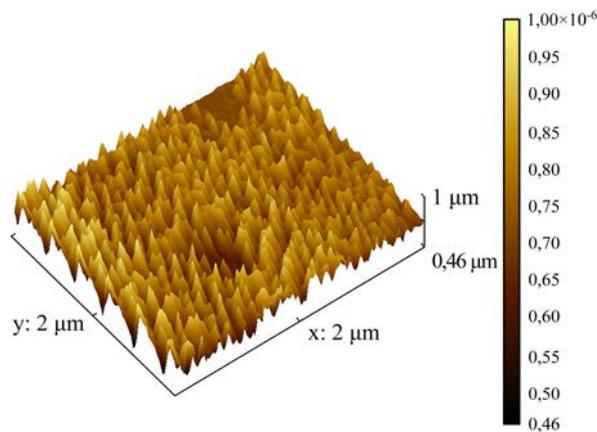
Магнитно-силовая микроскопия основана на регистрации сил взаимодействия между образцом и наноразмерным магнитным зондом (кантилевером). Стандартный магнитный зонд представляет собой кантилевер в атомно-силовой микроскопии покрытый тонкой магнитной пленкой [21]. МСМ дает возможность изучать магнитную структуру тонких пленок, объемных магнитных образцов, наноструктур и наночастиц с разрешением до нанометрового масштаба. Существуют два основных метода регистрации сигнала МСМ: измерение статического прогиба кантилевера и динамическая амплитудно-фазовая микроскопия.

При проведении магнитных исследований в магнитно-силовом микроскопе марки FM-Nanoview 1000 на субмикронном уровне прежде всего необходимо отделить «магнитные» изображения рельефа. На рис. 1 приведено изображение магнитного рельефа в образцах кремния, диффузионно-легированного примесными атомами германия.

Для получения доменной структуры в образцах кремния, содержащих кремний-германиевые соединения типа  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ , магнитные измерения проводились по



**Рис. 1.** Изображение магнитного рельефа в образцах кремния, диффузионно-легированного атомами германия, полученного магнитно-силовым микроскопом марки FM-Nanoview 1000.



**Рис. 2.** Изображение доменной структуры в образцах кремния, легированного примесными атомами германия, полученного с помощью магнитно-силового микроскопа марки FM-Nanoview 1000.

двухпроходной методике. На первом проходе определяется рельеф поверхности кремния, легированного атомами германия по контактно-му или прерывисто-контактному (полуконтактному) методу, а на втором проходе каждой линии сканирования (или изображения в целом) кантилевер приподнимается над поверхностью и сканирование осуществляется в соответствии с запомненным рельефом магнитной доменной структуры (рис. 2).

В результате на втором проходе расстояние между сканируемой поверхностью и закрепленным концом кантилевера поддерживается постоянным. При этом расстояние зонд–поверхность должно быть достаточно большим, чтобы пренебречь силами Ван-дер-Ваальса, так что на втором проходе кантилевер подвергается воздействию только дальнедействующей магнитной силы. Все спектры сил Ван-дер-Ваальса, вплоть до сил взаимодействия с магнитными нанокластерами примесных атомов германия в кремнии, описываются с применением теоретической модели, предложенной Дзялошинским, Лифшицем и Питаевским [22].

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Из литературных данных известно, что кремний-германиевые ( $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ ) твердые растворы в основном образуются методом жидкофазной технологии, которая не позволяет получать кремний-германиевые соединения на поверхности кремния с управляемой концентрацией минимальной толщины. Получение бинарных соединений  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  методом газофазной диффузии ограничивалось небольшим коэффициентом диффузии атомов германия в кремнии ( $D \sim 4 \times 10^{-13}$  см<sup>2</sup>/сек при  $T = 1250$  °C), что требует большого расхода электроэнергии и времени диффузии.

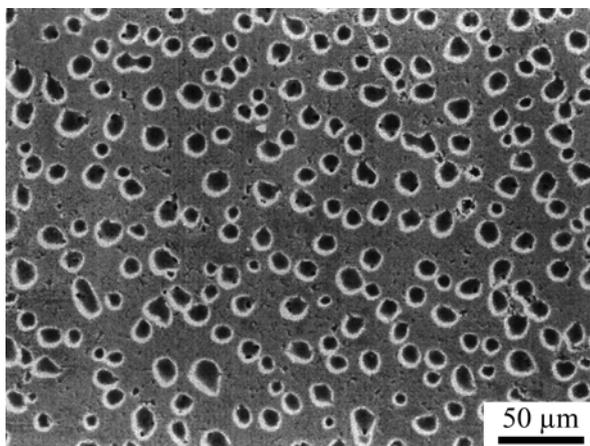
Коэффициент диффузии германия в кремнии в зависимости от температуры определяется следующей формулой:

$$D = 6 \times 10^{-5} \exp\left(\frac{-5,28}{kT}\right). \quad (1)$$

Диффузия примесных атомов германия производилась по двухэтапной диффузионной технологии, которая подробно описана в работе [19]. На первом этапе диффузии от комнатной

**Таблица.** Коэффициент диффузии и глубина проникновения примесных атомов германия в кремнии, полученные по расчетам с помощью формулы (1)

Температура, °С	1050	950	850	750
$D$ , см <sup>2</sup> /сек	$6 \times 10^{-17}$	$7 \times 10^{-19}$	$9 \times 10^{-20}$	$6 \times 10^{-23}$
$l$ , мкм	1,12	1,63	$5,82 \times 10^{-1}$	$1,41 \times 10^{-2}$



**Рис. 3.** Кластеры на поверхности кремния, состоящего из  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  соединения.

температуры до температуры  $T = 650$  °С электрическая печь нагревалась постепенно, после чего температура кварцевых ампул с образцами исходного кремния и диффузантами германия удерживалась в течение  $t = 30$  мин. После этого температуру электрической печи поднимали до необходимой температуры диффузии примесных атомов германия в кремнии в интервале температур  $T = 1150\text{--}1250$  °С и времени  $t = 2\text{--}4$  часа.

Анализ полученных результатов исследования электрофизических параметров образцов кремния с бинарными соединениями  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  показал, что разработанная двухэтапная диффузионная технология позволила получить образцы кремния, легированного примесными атомами германия, в которых глубина проникновения атомов германия в кремний в 6–8 раз больше, чем в кремний, полученный традиционным методом диффузии. Эти результаты исследования объясняются тем, что в двухэтапной диффузии, когда образцы кремния удерживаются при  $T = 650$  °С, образуется большое количество вакансий из-за ухода основных атомов кремния от узлов кристаллической решетки. В этом случае диффузия примесных атомов германия в кремнии происходит с помощью междоузельного механизма, что приводит к увеличению коэффициента диффузии примесных атомов германия.

В таблице приведены расчеты коэффициента диффузии и глубина проникновения примесных атомов германия при различных значениях температуры дополнительного термоотжига. В расчетах температура термоотжига подбиралась –  $T_1 = 750$  °С,  $T_2 = 850$  °С,  $T_3 = 950$  °С,  $T_4 = 1050$  °С, а время диффузии было

одинаковым для всех случаев в течение  $t = 5$  часов.

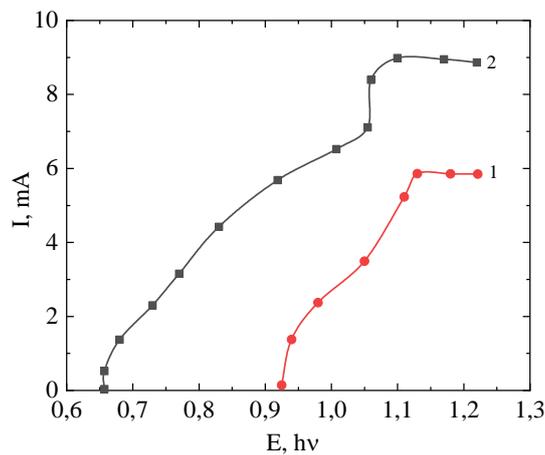
Как видно из таблицы, глубина проникновения примесных атомов германия в кремнии составляет порядка до десяти микрон. Эти теоретические расчеты показывают, что для получения кремния, объемно равномерно легированного примесными атомами германия, требуется достаточно большое время и высокая температура.

Определение элементного состава и концентрации веществ в полученных образцах производилось исследованием с помощью микрозондового анализатора марки Jeol Super Probe JXA-8800 R/RL. Снятие поверхностного слоя образцов кремния, легированного примесными атомами германия, осуществлялось с помощью специального травителя. Анализы результатов исследования также подтвердили, что примесные атомы германия в кремнии в зависимости от значения температуры дополнительного термоотжига в основном распределяются на поверхности и в приповерхностной области кремния.

Для определения распределения и плотности образованных кремний-германиевых соединений  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  в кремнии было исследовано поверхностное состояние кремния после диффузии (рис. 3). Исследования проводились на электронном микроскопе марки G 1600.

Из результатов исследования установлено, что на поверхности и в приповерхностном слое кремния образуются кластеры (соединения) германия с кремнием типа  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ , размер которых зависит от температуры диффузии и термоотжига, а также от условия диффузии [13].

Разработанная двухэтапная технология позволила получить на поверхности и в припо-



**Рис. 4.** Спектральная зависимость фотопроводимости образцов кремния при температуре  $T = 80$  К,  $U = 20$  В ( $1$  – контрольный образец КЭФ-100;  $2$  – кремний содержащие бинарные соединения  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ ).

верхностном слое кремния толщиной до  $d = 10,2\text{--}11,5$  мкм  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  бинарные соединения с уменьшающимися концентрациями их по глубине в зависимости от значения  $x$ . Анализ экспериментальных результатов показал, что на поверхности кремния образуется тонкий слой ( $\sim 0,3$  мкм) кремния, в котором содержится до 30% атомов германия, то есть образуются бинарные соединения с отношением  $\text{Ge}_{0,30}\text{Si}_{0,70}$ , после этого слоя доля примесных атомов германия экспоненциально уменьшается. На глубине  $x \geq 5$  мкм в кремнии состав бинарных соединений находится в следующем соотношении  $\text{Ge}_{0,05}\text{Si}_{0,95}$ . Таким образом, установлено, что с помощью разработанной диффузионной технологии можно получить  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  бинарные соединения, приводящие к образованию гетеро-варизонных структур, которые были подробно описаны в работе [23].

Исследования спектральной зависимости фотопроводимости кремния с бинарными соединениями  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  проводились на модернизированном спектрометре ИКС-21. Как видно из рис. 4, в образцах кремния с бинарными соединениями  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ , в отличие от контрольных образцов кремния без примесей атомов германия, наблюдается заметный рост фототока в интервале падающей энергии фотонов  $h\nu = 0,75\text{--}0,8$  эВ, а при  $h\nu = 1,1$  эВ – резкий рост фототока, что объясняется началом межзонных переходов в кремний. Увеличение фототока при энергии падающих фотонов в интервале  $h\nu = 0,75\text{--}0,8$  эВ в кремний с бинарными соединениями  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  можно объяснить тем, что в этих образцах имеется энергетический уровень величины, который меньше, чем энергия запрещенной зоны кремния [13]. Когда энергия падающих фотонов достигает  $h\nu = 0,75$  эВ, начинается выброс электронов в зону проводимости от образованных бинарных соединения  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  в кремнии, который приводит к фоточувствительности образцов кремния, легированного

примесными атомами германия. Это можно объяснить образованием бинарных соединений  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  в кремнии, ширина запрещенной зоны которых находится в интервале между энергией фотонов  $h\nu = 0,75\text{--}0,8$  эВ.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Формирование бинарных элементарных соединений  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  с максимальной концентрацией примесных атомов германия в кремнии и их распределение на поверхности и в приповерхностном слое кремния показаны на рис. 5. Как видно из рис. 5, распределение концентрации бинарных соединений  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  в кремнии после диффузии имеет экспоненциальный характер. Из анализа результатов исследования установлено, что на поверхности и в приповерхностном слое до  $\sim 0,5$  мкм образуется максимальная концентрация бинарных соединений  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  большой концентрации.

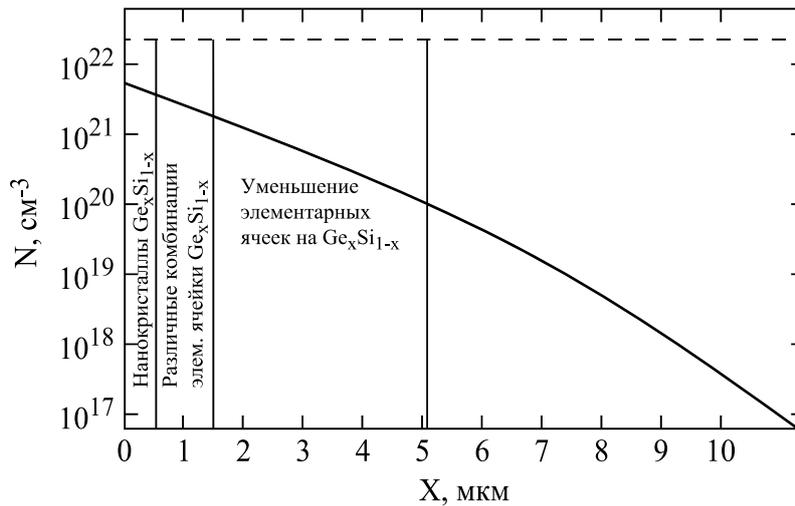
В дальнейшем с углублением в объем кремния концентрации примесных атомов германия, которые участвуют в образовании бинарных соединений  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ , экспоненциально уменьшается. Распределение концентрации атомов бинарного соединения  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  в кремнии можно разделить на четыре участка:

1. На поверхности, где концентрация образованных бинарных соединений  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  равна или больше, чем концентрация атомов кремния в исходном материале.

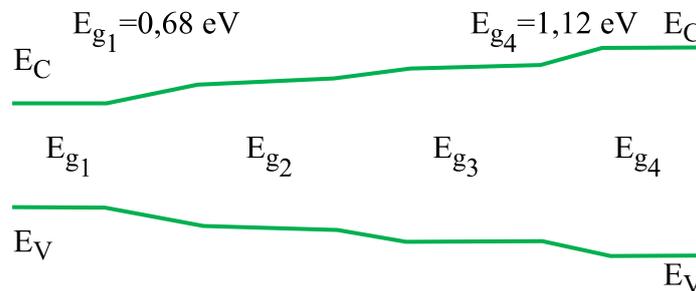
2. Концентрация бинарных соединений уменьшается и образуются нейтрально-молекулярные соединения типа  $\text{Si}_2\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ .

3. Число нейтрально-молекулярных соединений начинает увеличиваться, а бинарных соединений  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  – уменьшаться.

4. Участок, который в основном состоит из атомов кремния. На этом участке могут находиться бинарные соединения  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  и нейтральные молекулярные соединения



**Рис. 5.** Концентрация образованных бинарных соединений  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  на поверхности и в приповерхностном слое кремния. Штриховой линией показана концентрация атомов кремния в исходном материале.



**Рис. 6.** Гетероваризонная структура кремния с бинарными соединениями  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ .

$\text{Si}_2\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ , однако их концентрация намного меньше, чем концентрация атомов исходного кремния.

Анализ этих результатов исследований показывает, что на поверхности кремния концентрация бинарных соединений  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  будет достаточно большой и для образования химической связи в таких соединениях между атомами германия (Ge) и кремния (Si) требуется другая энергия, чем энергия связи между двумя атомами кремния, которая равна ширине запрещенной зоны чистого монокристаллического кремния  $E_{g\text{Si}} = 1,12$  эВ. Из литературных анализов известно, что ширина запрещенной зоны чистого монокристаллического германия равна  $E_g = 0,68$  эВ. При формировании бинарных соединений типа  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  меняется один из фундаментальных параметров кремния, то есть энергия обрыва ковалентной связи между атомами германия и кремния, которая будет больше, чем энергия обрыва германий-германиевой, и меньше, чем кремний-кремниевой химической связи.

Мы предполагаем, что в полученных образцах кремния, легированного примесными атомами германия, ширина запрещенной зоны меняется от  $E_{g1} = 0,68$  эВ для чистого монокристаллического германия до чистого кремния, ширина запрещенной зоны которого равна  $E_{g4} = 1,12$  эВ

(рис. 6) в зависимости от величины  $x$  в образованных бинарных соединениях  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ .

Полученные результаты исследования показали, что на поверхности кремния концентрация  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  бинарных соединений будет достаточно большая, что приведет к изменению энергии связи кристаллической решетки исходного материала. Для образования химической связи между атомами германия и кремния требуется другая энергия связи, чем энергия связи между двух атомов кремния.

Для определения ширины запрещенной зоны образованных гетероваризонных структур была исследована спектральная характеристика кремния, легированного примесными атомами германия, на спектрометре марки Lambda 950 UV/Vis/NIR.

Из анализа полученных результатов исследования спектра поглощения установлено, что в зависимости от величины  $x$  в образованных бинарных соединениях  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  в кремнии ширина запрещенной зоны полученных материалов меняется от  $E_{g1} = 0,78$  до  $E_{g2} = 0,94$  эВ.

Из угла наклона  $\Theta$  и решения функции Кубелки–Мунка была определена ширина запрещенной зоны образованных соединений  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  в кремнии на основе спектров, полученных на спектрометре Lambda 950 UV/Vis/NIR.

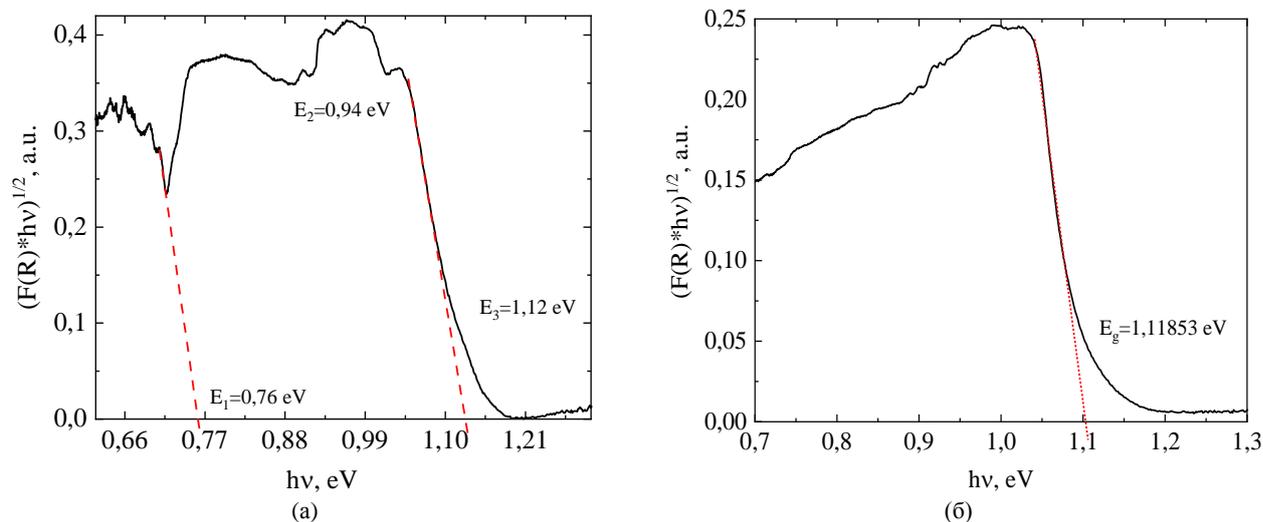


Рис. 7. Спектр поглощения кремния, легированного примесными атомами германия (а), и спектр поглощения исходного кремния (б), полученного на спектрометре марки Lambda 950 UV/Vis/NIR при  $T = 300$  К.

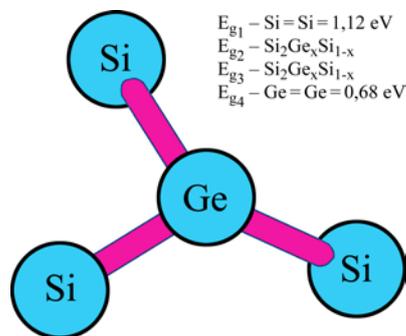
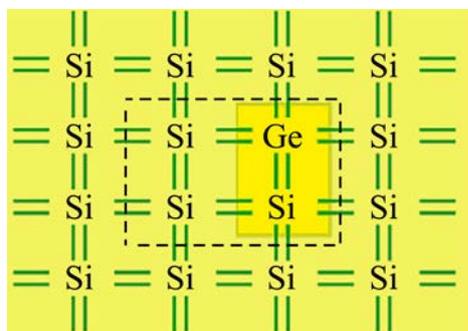


Рис. 8. Элементарная ячейка на основе молекулярно-нейтрального соединения  $\text{Si}_2\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  в кремнии,  $x$  – концентрация примесных атомов германия  $x_4 > x_3 > x_2$ .

$$F_{KM} = \frac{(1-R)^2}{2R},$$

$$hv \times F_{KM}^{1/n} = A(hv - E_g), \quad (2)$$

где  $F$  – функции Кубелки–Мунка;  $hv$  – энергия, определенная из наклона  $\Theta$ ;  $n$  – показатель зонной структуры полупроводника ( $n = 2$  прямозонный,  $n = 1/2$  – непрямоzonный полупроводник);  $A$  – коэффициент пропорциональности;  $E_g$  – ширина запрещенной зоны исходного кремния;  $R$  – коэффициент отражения.

Из полученных результатов спектра поглощения и теоретических расчетов была определена ширина запрещенной зоны кремния, легированного примесными атомами германия, которая равна для исходного монокристаллического кремния  $E_{g\text{Si}} = 1,126$  эВ, для чистого монокристаллического германия  $E_{g\text{Ge}} = 0,676$  эВ и для кремния с бинарными соединениями  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  находится в интервале энергии  $E_{g\text{GeSi}} = 0,76 \div 0,94$  эВ (рис. 7).

Расчетами установлено, что энергия ширины запрещенной зоны образованных соединений  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  равна  $E_g = 0,76$  эВ при  $x = 0,269$ , что намного меньше, чем ширина запрещенной зоны исходного кремния, которая приводит к образо-

ванию в кремнии микрогетероваризонных структур  $\text{Si}_2\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ . В работах [20, 21] авторами были получены бинарные твердые соединения  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$  на поверхности кремния, в которых было показано образование гетероструктур. В нашем случае были получены микрогетероваризонные структуры  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$  методом диффузионного легирования примесных атомов германия в кремнии.

Анализ этих результатов исследования показывает, что в образцах кремния, легированного примесными атомами германия, в широком интервале изменяются фундаментальные параметры (энергия ширины запрещенной зоны, подвижность и зонная структура) кремния, которые приводят к расширению спектрального диапазона фоточувствительности, что характерно для создания эффективных солнечных элементов. Кроме того, в приповерхностном слое кремния, легированного примесными атомами германия, можно получить гетероваризонные структуры с помощью диффузионной технологии (рис. 6).

Согласно анализу результатов исследования, полученных с помощью электронного сканирующего микроскопа, в элементном составе поверхности и в приповерхностной области

кремния установлено, что в кремнии могут образовываться бинарные соединения, концентрацией которых можно управлять технологическими режимами температуры и времени диффузии. В отличие от вышеуказанных различных комбинаций  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ , в кристаллической решетке кремния также могут образовываться молекулярно-нейтральные соединения, состоящие из трех атомов кремния, тетраэдрически окруженных атомами германия (рис. 8). Это означает, что на поверхности и в приповерхностном слое кремния образуется область, обогащенная примесными атомами германия, которая приводит к образованию молекулярно-нейтральных соединений типа  $\text{Si}_2\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  в решетке кремния. Установлено, что размер образованных соединений зависит от параметров примесных атомов и условий диффузионного легирования.

### ВЫВОДЫ

Разработанная диффузионная технология получения гетероэпитаксиальных структур на основе бинарных соединений  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  в кремнии представляет не только научный, но также большой практический интерес. Получение таких структур с определенными электрофизическими параметрами позволяет изменить фундаментальные параметры исходного кремния, которые существенно расширяют спектральную область чувствительности, что дает возможность создать на их основе оптоэлектронные чувствительные фотоприемники широкого спектра излучения, магнитодатчики и эффективные фотоэлементы в фотоэнергетике.

### БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность сотрудникам Института ионной плазмы и лазерной технологии Академии наук Республики Узбекистан за предоставленную возможность получения научных данных об элементном составе образцов кремния, легированного примесными атомами германия. Отдельную благодарность выражаем академику Академии наук Республики Узбекистан Р.А. Муминову за обсуждение полученных результатов и ценные советы.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### ЛИТЕРАТУРА

- Bakhadyrkhanov, M.K., Isamov, S.B. and Zikrillae, N.F., IR photodetectors in the range of  $\lambda = 1.5\text{--}8\ \mu\text{m}$ , based on silicon with multicharged nanoclusters of manganese atoms, *Russ. Microelectron.*, 2012, vol. 41, no. 6, p. 354. <https://doi.org/10.1134/S1063739712030043>
- Bakhadyrkhanov, M.K., Isamov, S.B., Zikrillae, N.F. and Arzikulov, E.U., Infrared quenching of photoconduction in silicon with multicharge manganese clusters, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2013, vol. 49, no. 4, p. 308. <https://doi.org/10.3103/S1068375513040029>
- Akimov, B.A., Bogoyavlenskii, V.A., Ryabova, L.I., Vasil'kov, et al., Thermally stimulated currents and instabilities of the photoresponse in PbTe(In) alloys at low temperatures, *Semiconductors*, 1999, vol. 33, no. 1, p. 6. <https://doi.org/10.1134/1.1187637>
- Dzhuliev, Kh.Kh., Leiderman, A.Yu. and Mamadalimov, A.T., Infralow-Frequency oscillations in photoconductivity of chromium-doped silicon, *Techn. Phys. Lett.*, 2003, vol. 29, no. 8, p. 638. <https://doi.org/10.1134/1.1606773>
- Ertler, Ch., Senekowitsch, P., Jaroslav F. and Potz, W., Self-consistent study of transport in Mn-doped semiconductor heterostructures, 2010, *14<sup>th</sup> Int. Workshop on Comput. Electronics*. <https://doi.org/10.1109/IWCE.2010.5677992>
- Melkikh, A.V., Rybakov, F.N. and Povzner, A.A., A distributed model of the organization of Joule-heating-induced autooscillations in a semiconductor, *Techn. Phys. Lett.*, 2005, vol. 31, no. 8, p. 706. <https://doi.org/10.1134/1.2035372>
- Bolduc, M., Awo-Affouda, C., Stollenwerk, A., Huang, et al., Above room temperature ferromagnetism in Mn-ion implanted Si, *Phys. Rev. B*, 2005, vol. 71, art. ID 033302.
- Shveikin, G.P. and Gusev, A.I., Nanomaterials, nanostructures, and nanotechnologies, *Inorg. Mater.*, 2006, vol. 42, no. 6, p. 696. <https://doi.org/10.1134/S0020168506060215>
- Parkhomenko, Yu.N., Belogorokhov, A.I., Gerasimenko, N.N., Irzhak, A.V., et al., Properties of self-organized SiGe nanostructures formed by ion implantation, *Semiconductors*, 2004, vol. 38, no. 5, p. 572. <https://doi.org/10.1134/1.1755894>
- Bakhadyrkhanov, M.K., Isamov, S.B. and Zikrillae, N.F., Current – voltage behavior of silicon containing nanoclusters of manganese atoms, *Inorg. Mater.*, 2014, vol. 50, no. 4, p. 325. <https://doi.org/10.1134/S0020168514040025>
- Bakhadirhanov, M.K., Isamov, S.B., Zikrillae, N.F., Koveshnikov, S.V., 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>
- Zhang, F.M., Zeng Y., Gao, J., Liu, X.C., et al., Ferromagnetism in Mn-doped silicon, *J. Magnet. Mater.*, 2004, vol. 282, p. 216. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2004.04.049>
- Zikrillae, N.F., Koveshnikov, S.V., Isamov, S.B., Abdurahmanov, 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, p. 29. <https://doi.org/10.1134/S1063782622020191>
14. Utamuradova, Sh.B., Interimpurity interaction in silicon doped with germanium and chromium, *Uzbek Phys. J.*, 2017, vol. 19, no. 4, p. 12.
  15. Burbaev, T.M., Zavaritskaya, T.N., Kurbatov, V.A. and Mel'nik, N.N., Optical properties of germanium monolayers on silicon, *Semiconductors*, 2001, vol. 35, no. 8, p. 941. <https://doi.org/10.1134/1.1393031>
  16. Zikrillaev, N.F., Ayupov, K.S., Shoabdurakhimova, M.M. and Urakova, F.E., 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.
  17. Zikrillaev, 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.
  18. Bakhadyrkhanov, M.K., Boltaks, B.I. and Kulikov, G.S., Diffusion, electrical transport and solubility of manganese impurity in silicon, *Fiz. Tverd. Tela*, 1972, vol. 14, no. 6, p. 1671.
  19. Bakhadirhanov, M.K., Abdurakhmanov, B.A. and Zikrillaev, N.F., On the state of germanium in silicon under conditions of low-temperature diffusion, *Devices*, 2018, vol. 5, p. 39.
  20. Abdurakhmanov, B.A., Iliev, Kh.M., Tachilin, S.A., Toshev, A.R. and Egamberdiev, B.E., The effect of silicon-germanium microheterojunctions on the parameters of silicon solar cells, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2010, vol. 46, no. 5, p. 505. <https://doi.org/10.3103/S1068375510050170>
  21. Zikrillaev, N.F., Mavlonov, G.H., Trabzon, L., Isamov, S.B., et al., Magnetic Properties of Silicon Doped with Impurity Atoms of Europium, *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 2023, vol. 15, no. 6, p. 06001(4pp), doi: 10.21272/jnep.15(6).06001.
  22. Dzyaloshinskii, I.E., Lifshitz, E.M. and Pitaevskii, L.P., The general theory of van der Waals forces, *Perspectives in Theoretical Physics*, 1992, p. 443. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-036364-6.50039-9>
  23. 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.org/10.1134/S1063782621060038>

### Summary

This paper presents the results of studies of the electrophysical, photoelectric, and magnetic properties of silicon samples doped by diffusion of germanium impurity atoms. It has been shown that impurity germanium atoms form in silicon binary compounds of the  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  type, the concentration of which varies with the depth of the original silicon. The developed diffusion technology of silicon doping with impurity germanium atoms made it possible to obtain a material with different concentrations of impurity germanium atoms, resistivity, and the type of conductivity. The optimal electrophysical parameters of the obtained samples for studying the electrophysical parameters and the magnetic properties were determined, which made it possible to show the possibilities of creating new types of sensors and devices for semiconductor electronics. The presented studies make it possible to develop respective directions in the field of materials science with magnetic properties and the creation of efficient photovoltaic cells for photo-energetics.

*Keywords:* silicon, germanium, concentration, impurity, spin, magnetic sensitivity, binary compound, diffusion