Электрофизические, фотоэлектрические свойства и элементный состав кремния, легированного примесными атомами селена

Н. Ф. Зикриллаев, М. М. Шоабдурахимова*, Л. С. Кариева

Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100174, Узбекистан,
**e-mail: shoabduraximova.m@gmail.com*

Поступила в редакцию 17.07.2025
После доработки 13.04.2026
Принята к публикации 14.04.2026

Описываются термодинамические условия получения кремния с нанокластерами примесных атомов селена без эрозии его поверхности с заданными электрофизическими параметрами. Показаны возможности получения образцов кремния с нанокластерами атомов селена при управлении давлением паров диффузанта. Установлено, что концентрация и размеры образованных нанокластеров примесных атомов в кремнии зависят от термодинамических условий и технологических режимов диффузии. Доказано, что примесные атомы селена в кремнии образуют нанокластеры, состоящие из четырех или шести атомов, которые значительно влияют на электрофизические и фотоэлектрические свойства кремния. Показаны возможности применения полученных образцов кремния, легированных примесными атомами селена, при создании полупроводниковых приборов с термостабильными и радиационно-стойкими параметрами.

Ключевые слова: кремний, полупроводник, примесь, селен, температура, нанокластер, диффузия

УДК 621.315.592
https://doi.org/10.52577/eom.2026.62.2.61

ВВЕДЕНИЕ

Развитие современных технологий позволяет получить нанокластеры примесных атомов на поверхности и в объеме полупроводникового материала. Из анализа литературных данных установлено, что образованные нанокластеры заметно изменяют электрические, фотоэлектрические, оптические и магнитные свойства исходного материала [1–4]. Исследования электрофизических и фотоэлектрических свойств полупроводниковых материалов с нанокластерами примесных атомов интересны тем, что с точки зрения фундаментальных представлений дают возможность получения информации о неравновесных термодинамических состояниях электрофизических параметров легированных материалов. В прикладном направлении открывается возможность создания новых классов полупроводниковых приборов с функциональными возможностями и чувствительных датчиков физических величин. Учеными и специалистами, занимающимися исследованием поведения нанокластеров в полупроводниковых материалах, установлено, что образованные нанокластеры примесных атомов находятся в неравновесном состоянии и при определенных термодинамических условиях продолжают захватывать новые атомы или могут распадаться с уходом атомов из нанокластеров в объем полупроводникового материала [5–8].

Исследования электрофизических свойств кремния, легированного примесными атомами селена, показали, что в определенных термодинамических условиях и технологических режимах диффузии на поверхности и в приповерхностном слое кремния образуются нанокластеры. Разработанная диффузионная технология позволила получить кремний с нанокластерами примесных атомов селена с заданными электрофизическими параметрами (зарядность, концентрация). Исследованием установлено, что число примесных атомов селена в образованных нанокластерах может меняться от четырех до шести, что серьезно изменяет электрофизические и фотоэлектрические свойства исходного кремния, и в этих образцах наблюдается ряд новых физических явлений [9–11].

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ОБРАЗЦОВ

Из литературного анализа установлено, что исследование свойств кремния, легированного примесными атомами селена, представляет не только научный интерес, но и имеет большое практическое значение. Однако применение этих

материалов в электронике ограничено тем, что диффузионная технология получения образцов кремния, легированного примесными атомами селена, с заданными степенями компенсации представляет определенные трудности. Установлено, что при получении кремния, диффузионно-легированного примесными атомами селена, для точного управления степенью компенсации исходного кремния необходимо определить с большой точностью растворимость и концентрацию электроактивных примесных атомов в зависимости от температуры диффузии. Также требуется постоянно поддерживать температуру диффузии ($T_Д$), что не всегда удается в технологических процессах. Нами впервые разработана воспроизводимая диффузионная технология получения кремния, легированного примесными атомами селена, с управлением упругостью паров диффузанта. Эти результаты исследований дали возможность получить материал с заданными электрофизическими параметрами, а также объяснить противоречивые экспериментальные данные других авторов в работах [12, 13] об электрофизических и фотоэлектрических свойствах кремния, легированного примесными атомами селена.

Для исследования были использованы исходные образцы кремния марки КДБ-2, КДБ-10 и КДБ-100 с р-типом проводимости. Теоретические расчеты показали, что для получения компенсированного кремния, легированного примесными атомами селена, с исходной концентрацией бора в диапазоне $N_B = 10^{16}–2\times10^{14}$ см$^{-3}$ требуется произвести диффузию в интервале температур T = 1150–1250 °С в течение t = 50–200 ч [14, 15]. Получение таких материалов с экономической точки зрения становится невыгодным, в этих образцах концентрация электроактивных примесных атомов селена составляет почти ничтожную долю от максимальной растворимости в кремнии. Кроме этого, в процессе легирования кремния с примесными атомами селена происходит сильная эрозия поверхности образцов кремния, тем самым появляется еще одна трудность при получении компенсированных образцов Si<Se> с воспроизводимыми электрофизическими параметрами. Такие трудности, несомненно, ставят задачи поиска новых способов диффузионного легирования кремния примесными атомами селена, позволяющих получать компенсированные и перекомпенсированные образцы кремния с малыми энергозатратами и хорошим качеством поверхности [16].

Диффузия примесных атомов селена в кремнии проводилась в интервале температур T = 1000–1250 °С в кварцевых ампулах, откаченных до вакуума в пределах $P = 10^{-5}–10^{-6}$ мм рт. ст. с учетом и без учета упругости паров примесных атомов. Легирование кремния примесными атомами селена осуществлялось в два этапа диффузионной технологии, которая была подробно описана в работе [17] и позволила получить образцы без эрозии поверхности.

Результаты исследования показали, что, управляя давлением паров примесных атомов селена при одной и той же температуре диффузии, можно получить образцы не только с различными удельными сопротивлениями, но также и типом проводимости с максимальной электроактивной концентрацией примесных атомов селена. Кроме этого, показано, что, управляя упругостью паров диффузантов селена в кварцевой ампуле, можно будет свести к минимуму эрозию поверхности образцов кремния, существенно сократить время диффузионного отжига и получить образцы кремния с заданными электрофизическими параметрами.

Эти результаты исследований открывают новый способ технологии получения полупроводниковых материалов с заданными и воспроизводимыми параметрами, а также дают объяснение противоречивым литературным данным авторов работ [18, 19] об электрофизических свойствах компенсированного кремнии без учета давления паров диффузанта.

Сравнением полученных результатов (табл. 1) с литературными данными установлено, что при одинаковых технологических условиях диффузии электроактивная концентрация примесных атомов селена в образцах кремния будет существенно больше, чем в образцах, полученных без учета давления паров диффузанта. Из анализа результатов исследований следует, что при диффузии примесных атомов селена без учета упругости паров диффузанта происходит эрозия поверхности образцов кремния и практически невозможно не только управлять концентрацией электроактивных примесных атомов, но и получить материал с заданной степенью компенсации и электрофизическими параметрами.

Из анализа научных результатов установлено, что для получения кремния с определенными электрофизическими параметрами необходимо управлять термодинамическими условиями и режимом диффузии, а также обязательно учитывать электрофизические параметры исходного кремния. Проведенные исследования показали, что подбором исходного кремния с

Таблица 1. Параметры образцов кремния, легированного атомами селена при различных значениях упругости паров диффузанта (T_D = 1200 °C, t = 10 ч)

№	Упругость давления паров атомов селена, атм	Тип проводимости полученных образцов после диффузии	Удельное сопротивление, Ом×см	Концентрация носителей, $см^{-3}$
1	0,1	*p*	18	$1,2\times10^{15}$
2	0,3	*p*	60	$3,5\times10^{14}$
3	0,5	*p*	$3,1\times10^{2}$	$6,7\times10^{13}$
4	0,75	*p*	$4,7\times10^{3}$	$4,5\times10^{12}$
5	1,0	*p*	$6,8\times10^{4}$	$3,1\times10^{11}$
6	1,5	*p*	$1,25\times10^{5}$	$1,7\times10^{11}$
7	2,0	*n*	$1,1\times10^{5}$	$6,7\times10^{10}$
8	2,5	*n*	$8,3\times10^{4}$	$8,2\times10^{10}$
9	3,0	*n*	$2,6\times10^{4}$	$2,3\times10^{11}$
10	4,0	*n*	$5,9\times10^{3}$	$8,8\times10^{11}$
11	Исходный образец КДБ-10	*p*	10	2×10^{15}

Таблица 2. Электрофизические параметры кремния, легированного примесными атомами селена, при различных температурах диффузии

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

*Время диффузии для всех случаев было одинаково t = 10 ч.

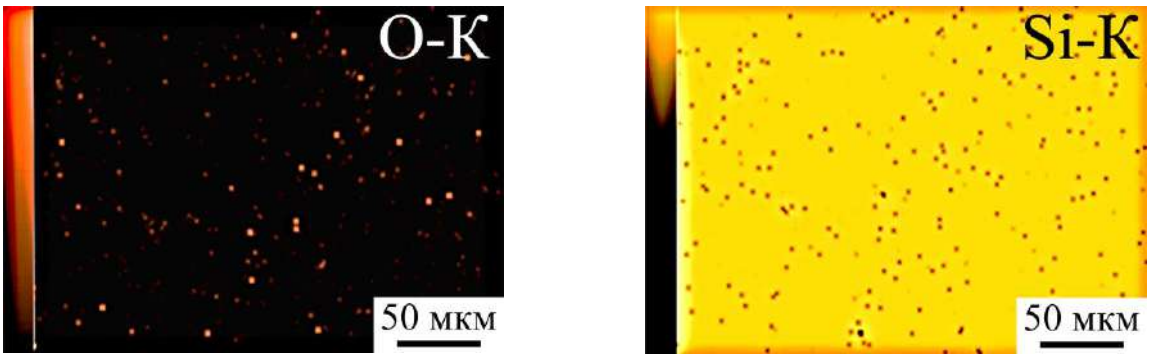
различными концентрациями бора можно получить материал с разными электрофизическими параметрами в одинаковых термодинамических условиях диффузии. Эти результаты предоставляют возможность управления электрофизическими параметрами кремния, легированного примесными атомами селена, в широком интервале, то есть получить материал с заданным удельным сопротивлением ($\rho = 10^{2}$–10^{5} Ом×см) и типом проводимости. Для определения влияния примесных атомов селена на электрофизические и фотоэлектрические свойства кремния параллельно в тех же термодинамических условиях диффузии проводился термоотжиг исходного кремния без примесных атомов селена.

Исследования электрофизических параметров кремния с нанокластерами примесных атомов селена проводились на установке Ван дер Пау марки Ecopia HMS-3000 Hall Measurement System. В табл. 2 показаны основные электрофизические параметры образцов кремния с нанокластерами примесных атомов селена в зависимости от концентрации технологических примесных атомов бора в исходном кремнии.

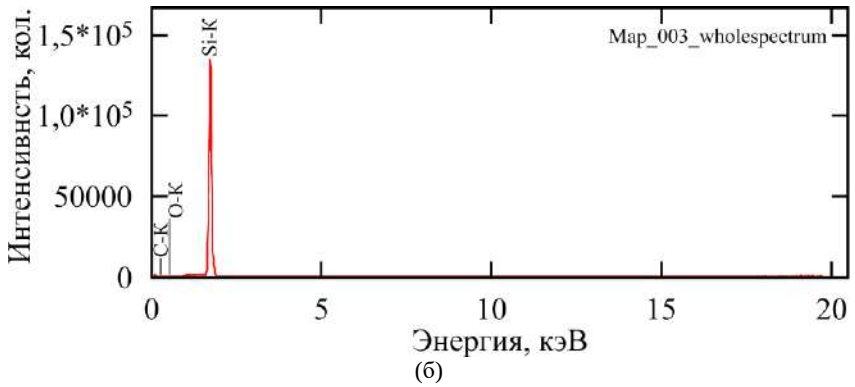
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Элементный состав образцов кремния, легированного примесными атомами селена, исследовался на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) марки Joel JSM-IT200LA. На рис. 1 представлены микрофотографии поверхности и элементный состав образцов кремния, легированного примесными атомами селена, с учетом давления паров диффузанта. Держатель СЭМ позволил одновременно закрепить четыре образца кремния, что дало возможность сравнить результаты исследований друг с другом (рис. 1а). Данные эксперимента показали, что в исходных образцах кремния, которые подвергались термоотжигу при температуре диффузии без примесных атомов селена, на поверхности образуется оксидный слой SiO_2 (рис. 1б). Интенсивность пика, которая связана с образованием оксидного слоя, намного меньше, чем пик чистого кремния.

В образцах кремния, легированного примесными атомами селена, наблюдаются дополнительные пики (рис. 2а), которые показывают наличие отдельных примесных атомов селена и нанокластеров, состоящих из четырех и шести атомов селена в кремнии. Определен элементный



(а)

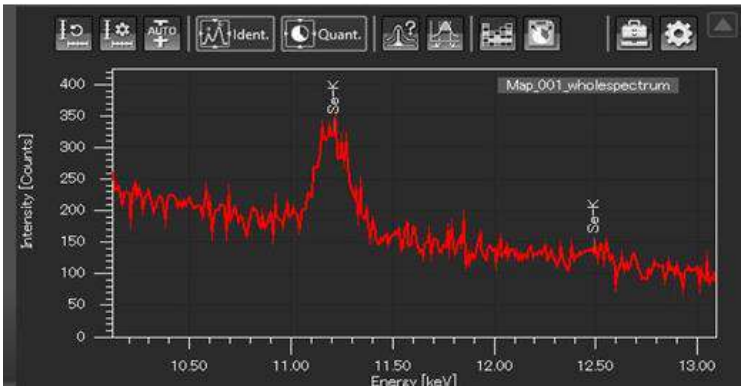


(б)

Элемент	Линии	Масса, %	Атом, %
O	K	31,65±0,05	44,97±0,08
Si	K	68,35±0,06	54,88±0,04
Всего		100,00	100,00

(в)

Рис. 1. Микрофотография поверхности (а), спектр (б), элементный состав кремния, подвергшегося термоотжигу без примесных атомов селена, полученные на сканирующем электронном микроскопе марки Jeol JSM-IT200LA (в).



(а)

Элемент	Линия	Масса, %	Атом, %
O	K	35,62±0,04	49,47±0,05
Si	K	63,61±0,03	50,32±0,03
Se	L	0,77±0,01	0,22±0,00
Всего		100,00	100,00

(б)

Рис. 2. Спектр (а) и элементный состав кремния, легированного примесными атомами селена, полученные сканирующим электронным микроскопом марки Joel JSM-IT200LA (б).

состав кремния, легированного примесными атомами селена, в котором концентрация примесных атомов селена на поверхности составляет по процентному соотношению массы относительно кремния 0,22%, концентрация атомов кремния по массе равна 50,32%, концентрация атомов кислорода по массе – 49,47%.

Эти результаты были получены на поверхности кремния, легированного примесными атомами селена, после диффузии и проведенного дополнительного термоотжига. Иссле-

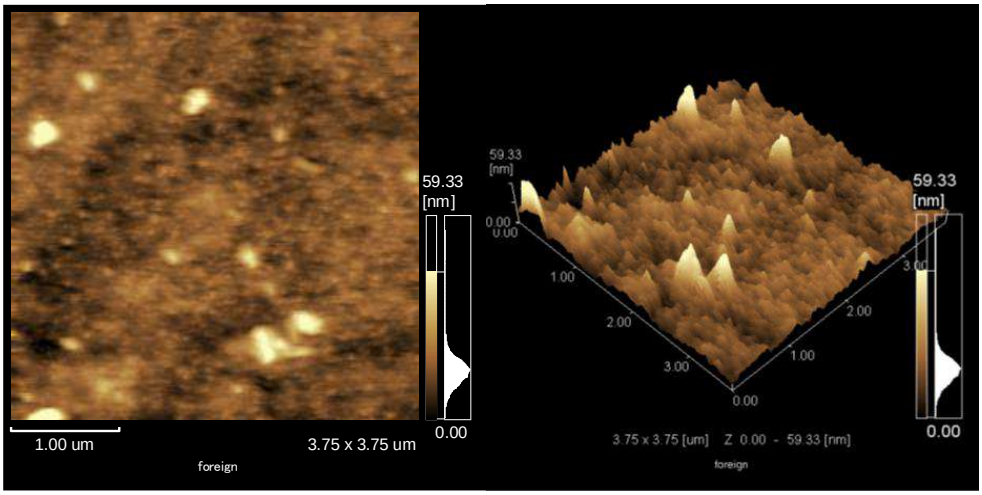


Рис. 3. АСМ-изображения поверхности кремния с нанокластерами атомов селена.

дованием установлено, что с углублением в объем кремния концентрация примесных атомов селена уменьшается по массе до $1{,}7\times10^{-6}$%, что объясняется диффузионным распределением атомов в кремнии ($N_{Se}\approx2\times10^{16}$ см$^{-3}$) [20].

На рис. 3 представлены изображения поверхности образцов кремния с нанокластерами примесных атомов селена, полученные на атомно-силовом микроскопе (АСМ). Пики на поверхности образцов Si<Se> отличаются от поверхности исходного кремния, которая была значительно более гладкой, и можно предполагать, что острые пики связаны со значительным локальным зарядом поверхности из-за многозарядных кластеров примесных атомов селена. Примесные атомы селена, образовав кластеры, локализуются на поверхности и в объеме кремния, что приводит к возникновению значительных внутренних электростатических полей.

В ходе эксперимента с помощью послойного химического травления поверхности кремния были сняты слои до глубины 20 мкм с шагом 0,5 мкм, и результаты АСМ показали, что величина потенциального рельефа уменьшается с углублением в объем кремния. Начиная с глубины порядка ~ 10 мкм появление пиков резко уменьшается. Эти результаты соответствуют результатам исследования диффузионного распределения примесных атомов селена в кремнии, полученным другими авторами [21–23]. Как известно, примесные атомы селена в кремнии имеют очень маленький коэффициент диффузии. Установлено, что на втором этапе высокотемпературной диффузии в интервале температур T = 1000–1250 °C в течение t = 10 ч примесные атомы проникают в глубь исходного кремния до 10–15 мкм. Это означает, что образованные многозарядные нанокластеры примесных атомов селена экспоненциально уменьшаются с углублением в кристаллическую решетку кремния.

ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование фотоэлектрических свойств полученных образцов кремния, легированного примесными атомами селена, при относительно низких температурах (T = 80–250 К) проводилось в специальном криостате, который позволяет управлять температурой и интенсивностью освещенности как интегрального, так и монохроматического света. Исследования фотопроводимости полученных образцов кремния, легированных примесными атомами, показали, что при фоновом освещении воздействие дополнительного монохроматического излучения в интервале энергии фотонов $h\nu$ = 0,3–0,7 эВ наблюдается инфракрасное (ИК) гашение фотопроводимости при наличии фонового интегрального света [24]. Показано, что с ростом концентрации электроактивных примесных атомов селена в кремнии интервал гашения сокращается, то есть фототок уменьшается более резко, а также сужается интервал энергии падающих фотонов, в котором наблюдается ИК-гашение фототока.

Для определения зависимости глубины и интервала ИК-гашения от энергии падающих фотонов исследования проводились в интервале энергии фотонов $h\nu$ = 0,2–0,7 эВ. Как видно из рис. 4, значение кратности ИК-гашения фототока в образцах Si<Se> находится в интервале $h\nu$ = 0,21–0,71 эВ. Установлено, что в интервале $h\nu$ = 0,21–0,71 эВ ИК-гашения можно управлять изменением интенсивности ИК-излучения, а также концентрацией электроактивных примесных атомов селена.

В литературе имеется очень много теоретических работ, посвященных возможности появления области неоднородности в полупроводни-

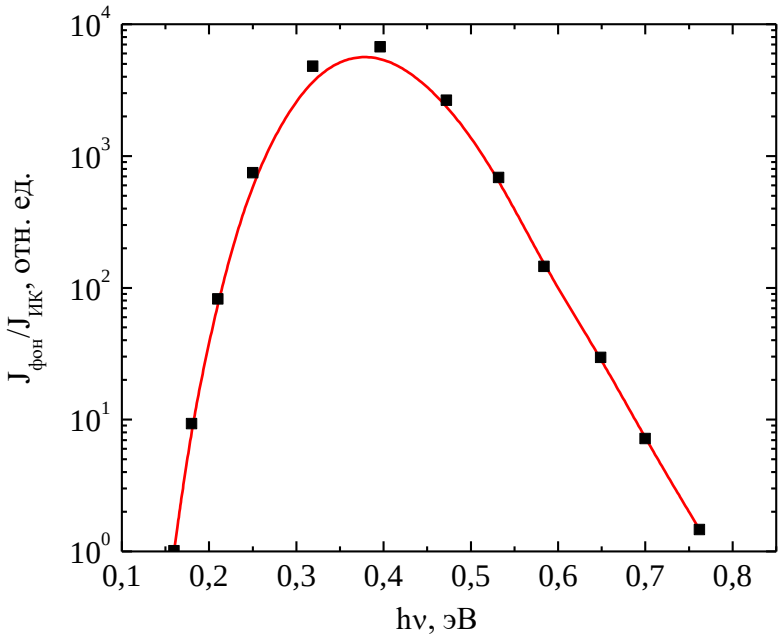


Рис. 4. Спектральная зависимость ИК-гашения в образцах кремния, легированного примесными атомами селена, при T = 80 К, I_{hv} = 10^{-6} Вт/см^2×с, E = 40 В/см.

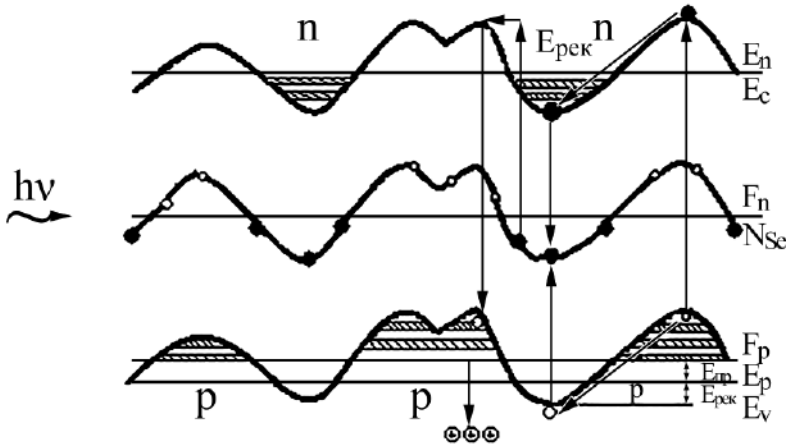


Рис. 5. Флуктуация потенциального рельефа зоны проводимости кремния, легированного примесными атомами селена.

ковых материалах за счет образования нанокластеров [21–23] в условиях сильной компенсации. Однако эти авторы в основном рассматривают полупроводниковые материалы, которые легировались примесными атомами, создающими мелкие энергетические уровни в запрещенной зоне материала. Как известно, такие примеси в основном обладают небольшими коэффициентами диффузии и находятся в однократно заряженных состояниях. В отличие от них примесные атомы, создающие глубокие энергетические уровни, обладают большим коэффициентом диффузии, являясь многократно заряженными, и активно взаимодействуют с носителями заряда и дефектами кристаллической решетки [24]. Поэтому в компенсированном кремнии, легированном элементами, создающими глубокие энергетические уровни, сильнее проявляются неоднородности материала по сравнению с примесями, создающими мелкие энергетические уровни в запрещенной зоне материала.

Для объяснения механизма образования нанокластеров примесных атомов селена и механизма ИК-гашения фотопроводимости предлагается модель неоднородного полупроводника, предложенная Шиком и Шейнкманом [24]. Согласно этой модели в неоднородном полупроводнике возникают флуктуации рельефа зоны проводимости и валентной зоны. Это связано с тем, что в условиях сильного легирования концентрации примесей доходят до $N \approx 10^{18}$–10^{19} см$^{-3}$ и из-за неоднородного распределения этих примесных атомов появляются неоднородности, приводящие к флуктуации зоны проводимости и валентной зоны полупроводника. В нашем случае, хотя концентрация примесных атомов селена на два порядка меньше, чем в условиях сильного легирования, эти примесные атомы в кремнии находятся в двукратно ионизированном состоянии и

образуют нанокластеры [25], заряд которых всегда больше, чем ±2. Радиусы дебаевского экранирования образованных нанокластеров перекрываются друг другом, что приводит к образованию нанопотенциального рельефа в кремнии. Эти флуктуации зонной диаграммы (рис. 5) сильнее проявляются при относительно низких температурах (T = 80 К).

При освещении полученных образцов Si<Se> в интервале температур T = 80–160 К в случае приложенного напряжения электрического поля наблюдается ИК-гашение фотопроводимости. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению фотопроводимости образцов за счет выброса электронов от глубокого энергетического уровня селена в зоне проводимости и последующей рекомбинации с дырками, находящимися в валентной зоне. Свободные электроны рекомбинируются с дырками в валентной зоне через уровни рекомбинации. Вследствие этого происходит уменьшение концентрации и времени жизни дырок на уровне протекания, то есть происходит ИК-гашение фотопроводимости.

Исследование элементного состава кремния, легированного примесными атомами селена, показало, что в спектре образуются пики, соответствующие энергиям 11,23 и 12,53 кэВ, которые подтверждают наличие нанокластеров примесных атомов селена, состоящих из молекул Se_4 или Se_6. Эти результаты исследований соответствуют результатам, полученным другими авторами, которые исследовали электрофизические и фотоэлектрические свойства кремния, легированного примесными атомами селена [7, 12].

Установлено, что в образцах кремния, легированного примесными атомами селена, когда степень компенсации находится в интервале K = 0,94–1,1, то есть в компенсированных и перекомпенсированных образцах, в которых уровень Ферми находится в интервале E_c-0,45–E_v+0,35 эВ, наблюдается ИК-гашение фотопроводимости. Известно, что в этом интервале энергии в запрещенной зоне кремния расположен донорный уровень примесных дважды положительно ионизированных атомов селена с энергией E_c – 0,5 эВ. Показано, что в этом интервале уровень Ферми находится вблизи энергетического уровня примесных атомов селена. Образованные нанокластеры состоят из четырех (Se_4) или шести (Se_6) атомов селена, каждый атом находится в дважды ионизированном состоянии. Эти нанокластеры приводят к появлению сильно положительно заряженных центров, которые в свою очередь способствуют возникновению неоднородного состояния образцов кремния, легированного атомами селена (Si<Se>).

Установлено, что величина степени компенсации приводит к изменению величины потенциального барьера в рельефе зоны проводимости и валентной зоны. В образцах Si<Se> при степени компенсации $K \approx 1$ наблюдается максимальная величина образованного потенциального рельефа неоднородности. Поэтому именно в этих образцах происходит наиболее эффективное разделение фотовозбужденных носителей зарядов, то есть электронов в ямах зоны проводимости и образованного энергетического уровня селена E_c – 0,5 эВ, а также накопление дырок в энергетических минимумах валентной зоны. Показано, что в образцах Si<Se>, как при n-(K>1), так и p-(K<1), амплитуда образованного потенциального рельефа неоднородности материала уменьшается за счет уменьшения зарядового состояния примесных атомов селена. В этих случаях дебаевская экранизация неоднородности, образованная при сильной компенсации, компенсируется носителями заряда (за счет дырки). При таком распределении уменьшается эффективность разделения носителей зарядов, что сопровождается уменьшением концентрации дырок в валентной зоне. В образцах n-Si<Se> потенциальное поле, созданное при двойной ионизации атомами селена, компенсируется с увеличением приложенного электрического поля или интенсивности освещения. В низкоомных образцах кремния, легированного примесными атомами селена р-типа проводимости, барьеры уменьшаются за счет большой концентрации равновесных дырок в кремнии и уменьшения концентрации нанокластеров атомов селена.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатами проведенных исследований кремния диффузионно-легированного примесными атомами селена, установлено, что при определенных термодинамических условиях (температура T = 1100–1200 °С, время t = 10–15 ч) и давлении паров диффузанта формируются нанокластеры. В образованных нанокластерах число атомов селена может быть от четырех до шести, которые приводят к изменению электрофизических и фотоэлектрических свойств исходного кремния. Также установлено, что концентрация образованных нанокластеров зависит от концентрации примесных атомов бора в исходном кремнии. Анализ результатов исследований показал, что для примесных атомов селена, диффундирующих в кремнии, существуют оптимальные термодинамические условия диффузии, при которых интенсивно форми-

руются нанокластеры, в свою очередь приводящие к появлению флуктуации зоны проводимости и валентной зоны.

Предложенная модель неоднородного полупроводника хорошо согласуется с современной моделью сверхрешетки, которая широко применяется в полупроводниковой электронике. Как известно из литературных данных, сверхрешетки состоят из чередующихся слоев двух видов полупроводников, различающихся составом или типом проводимости [26, 27]. Одним из видов сверхрешетки являются легированные сверхрешетки, в которых периодично-последовательно меняются *n*- и *p*-типы проводимости одного и того же полупроводника. Установлено, что дополнительный потенциал создают чередующиеся заряды ионизированных акцепторов и доноров, и это приводит к изменению зонной структуры исходного материала. Как известно, сверхрешетки в основном получаются с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), позволяющей выращивать чередующиеся слои любого состава и толщины. Однако современные установки МЛЭ не всегда доступны из-за высокой себестоимости и требуют больших затрат электроэнергии.

Разработанная диффузионная технология легирования кремния примесными атомами селена позволила получить компенсированный кремний с нанокластерами, которые приводят к флуктуации зонной диаграммы.

Данные образцы кремния, легированные примесными атомами селена, можно рассматривать как новый материал, обладающий необычными электрофизическими и фотоэлектрическими свойствами. Изменение зарядности и концентрации атомов в образованных нанокластерах позволяет в широком диапазоне варьировать зонную структуру и фундаментальные параметры исходного кремния, что открывает в физике полупроводников новое направление – «зонная инженерия» в электронике.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баграев, Н.Т., Мирсаатов, Р.М., Половцев, И.С., Юсупов, А., Цинк в кремнии: фотоиндуцированные реакции. *Физика и техника полупроводников*, 1992, т. 26, № 3, с. 481.
2. Karazhanov, S.Zh., Properties of precisely compensated semiconductors. *Semiconductors*. 2000, vol. 34, no. 8, p. 909-916.
3. Булярский, С.В., Серёжкин, Ю.И., Ионычев, В.К., Определение параметров глубоких энергетических уровней в кремнии на основе анализа рекомбинационного тока перехода, *Изв. ВУЗов. Электроника*. 1999, № 1–2, с. 41.
4. Zikrillaev, N.F., Urakova, F.E., Toshev, A.R., Kushiev, G.A., et al., Physical and magnetic properties of silicon doped with impurity germanium atoms. *East european journal of physics*, no. 1, 2025, p. 184.
5. Zikrillayev, N.F., Mavlonov, G.Kh., Trabzon, et al., Magnetic properties of silicon with paramagnetic impurity atoms. *East European Journal of Physics*. 2023, vol. 3, p. 380.
6. Taskin, A.A. and Tishkovsky, E.G., Formation of Se_2 quasimolecules in silicon doped with selenium. *Semiconductors*, 1998, vol. 32, no. 11, p. 1306.
7. Zikrillaev, N.F., Sattorov, A.A., Zikrillaev, X.F., Kurbanova, U.Kh., et al., Effect of Uniaxial Compression on Excitation Conditions and Parameters of Low Frequency Auto-Oscillations of Current in Compensated Silicon. *Journal of Nano and Electronic Physics*, 2025, vol. 17, no. 2, p. 02014.
8. 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.
9. Bakhadyrkhanov, M.K., Zikrillaev, N.F. and Arzikulov, E.U., Effect of elasticity of diffusant vapors on concentration of electroactive atoms and degree of compensation of Si<Zn> models. *Pisma v Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki*, vol. 17, no. 12, p. 1.
10. Zikrillaev, N.F., Ayupov, K.S., Shoabdurakhimova, M.M., Urakova, F.E. et al., Self-oscillatory processes in silicon, problems and prospects for research, and their application in electronics, *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2024, vol. 60, no. 1, p. 75.
11. Astrov, Yu.A., Kozlov, V., Lodygin, A.N., Portsel, L., et al., Redistribution of deep selenium and sulfur impurities in silicon upon surface doping with phosphorus. *Semiconductors*, 2009, vol. 43, no. 6, p. 710.
12. Астрова, Е.В., Большаков, И.Б., Лебедев, А.А., Михно, О.А., Энергетические уровни селена в кремнии. *Физика и техника полупроводников*, 1985, т. 19, № 4, с. 597.
13. Bakhadyrkhanov, M.K., Askarov, Sh.I. and Norkulov, N., Some features of chemical interaction between a fast diffusing impurity and group VI element in silicon. *Phys. Solid. Stat.* 1994, no. 142, p. 339.
14. Bakhadyrkhanov, M., Boltaks, B.I. and Kulikov, G., Diffusion electrotransport and solubility of manganese impurities in silicon. *Sov. Phys. Solid State*. 1972, vol. 14, no. 6, p. 1671.
15. Болтакс, Б.И., Городецкий, С.М., Бахадырханов, М.К., и др., Компенсированный кремний. Л.: Наука. 1972. с. 123.

16. Zikrillaev, 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 European Journal of Physics*, 2023, no. 4, p. 251.

17. Абдурахманов, Б.А., Аюпов, К.С., Бахадирханов, М.К., Илиев, Х.М., и др., Низкотемпературная диффузия примесей в кремний. *Доклад Академии наук Республики Узбекистан (ДАН РУз)*. 2010, № 4, с. 32.

18. Таланин, В.И., Таланин, И.Е., Комплексообразование в полупроводниковом кремнии в соответствии с моделью твердого тела, *ФТТ*, 2016, т. 58, № 10, с. 1977.

19. Утамуродова, Ш.Б., Межпримесные взаимодействия в кремнии, легированном германием и хромом, *Узб. физ. журнал*, 2017, т. 19, № 4, с. 12.

20. Таскин, А.А., Тишковский, Е.Г., Образование комплексов, связанных с атомами селена в кремнии. *Физика и техника полупроводников*, 2002. т. 36. № 6, с. 641.

21. Bakhadyrkhanov, M.K., Ismaylov, B.K., Tachilin, S.A., Ismailov, K.A., et al., Influence of electrically neutral nickel atoms on electrical and recombination parameters of silicon. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, ISSN 1560-80342020, vol. 23, no. 4, p. 361.

22. Каражханов, С.Ж., Свойства точно компенсированных полупроводников, *ФТП*, 2000, т. 34, № 8, с. 909.

23. Zikrillaev, N.F., Kurbanova, U.Kh., Shoabdurkhimova, M.M., Narkulov, N. et al., Effect of the magnetic field, electric field, and light intensity on the parameters of recombination waves in silicon, *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2024, vol. 60, no. 5, p. 691.

24. Шейнкман, М.К., Шик, А.Я., Долговременные релаксации и остаточная проводимость в полупроводниках. *ФТП*, 1976, т. 10, № 2, с. 209.

25. Дрокин, Н.А., Ганиев, Ш.М., Электрическая неустойчивость тока в области пространственной неоднородности поля в полупроводниках, Красноярск, 1991.

26. Лозовский, В.Н., Константинова, Г.С., Лозовский С.В., Нанотехнология в электронике. Санкт-Петербург, Москва, Краснодар, 2008, с. 164.

27. Щука, А.А., Наноэлектроника: учебник для вузов. М.: Изд.: Юрайт, 2025, с. 297.

Summary

The thermodynamic conditions for obtaining silicon with nanoclusters of selenium impurity atoms, without surface erosion and with the specified electrophysical parameters, are described. The possibilities of producing silicon samples containing selenium nanoclusters by controlling the vapor pressure of the diffusant are demonstrated. It has been established that the concentration and size of the formed nanoclusters of impurity atoms in silicon depend on the thermodynamic conditions and the diffusion process parameters. It is shown that selenium impurity atoms in silicon form nanoclusters consisting of four or six atoms, which significantly affects the electrophysical and photoelectric properties of silicon. The potential application of silicon samples doped with selenium impurity atoms for the development of semiconductor devices with thermally stable and radiation-resistant characteristics is demonstrated.

Keywords: silicon, semiconductor, impurity, selenium, temperature, nanocluster, diffusion