

**MASHINASOZLIK, ASBOBSOZLIK, METROLOGIYA**

УДК 621.315.592

**ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ КЛАСТЕРА АТОМОВ ГАДОЛИНИЯ В
КРЕМНИЕВЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДАТЧИКАХ.****Исраилов Фахриддин Мурадқосимович**дотцент кафедры Метрологии и стандартизации
Джизакский политехнический институт
E-mail: metrologiyafaxriddin@gmail.com,**Эгамбердиев Бахром Эгамбердиевич**professor of the department of Metrology and standardization
Tashkent State Technical University
E-mail: bahrom_prof@mail.ru

Gadoliniyни кремнийга bosqichma-bosqich past haroratli diffuziya qilish texnologiyasi ishlab chiqilgan bo'lib, bu materialning butun hajmi bo'ylab tarqalgan nopoklik atomlari klasterlarini yaratishga imkon beradi. Ko'rsatilganki, yuqori haroratli diffuziyali qotishma bilan olingan namunalardan farqli o'laroq, yangi texnologiya yordamida olingan namunalarda sirt eroziyasi, qotishmalar va er yuzasiga yaqin mintaqada silitsidlar hosil bo'lmaydi. Gadoliniiy aralashmalari atomlari klasterlarini o'z ichiga olgan kremniy namunalarning yuqori issiqlik va radiatsiya qarshiligi aniqlandi.

Kalit so'zlar: gadoliniiy, texnologiya, klaster, eroziya, past haroratli diffuziya, doping, issiqlikka chidamlilik, degradatsiya

Разработана технология поэтапной низкотемпературной диффузии гадолия в кремний, позволяющая создать кластеры примесных атомов распределенных по всему объему материала. Показано, что в отличие от образцов, полученных высокотемпературным диффузионным легированием, в образцах полученных по новой технологии отсутствует эрозия поверхности, образование сплавов и силицидов в приповерхностной области. Установлена повышенная термо- и радиационная стойкость образцов кремния содержащих кластеры примесных атомов гадолия.

Ключевые слова: гадолий, технология, кластер, эрозия, низкотемпературная диффузия, легирование, термостойкость, деградация.

A technology for a steady low-temperature diffusion of gadolinium into silicon, which allows one to create clusters of impurity atoms distributed throughout the material, was developed. It was shown that, in contrast to samples obtained by high-temperature diffusion doping, the samples diffusion doped by applying new technology do not have surface erosion, or form alloys and silicides on the surface. The increased thermal and radiation resistance of silicon samples containing clusters of impurity atoms of gadolinium were revealed.

Keywords: gadolinium, technology, cluster, erosion, low temperature diffusion, alloying, heat resistance, degradation.

Введение

В настоящее время в мире активно развивается физика полупроводников,

где пристальное внимание уделяется получению нового типа материала путем формирования на поверхности и в объеме кремния кластеров,



изменяющих его фундаментальные параметры. Разработка технологии формирования кластеров примесных атомов, позволяющей создавать наноразмерные структуры в объеме кристалла с достаточно высокой концентрацией и заданными составом, структурой и физическими параметрами является одной из основных задач современной микроэлектроники [1-5].

Полупроводниковые материалы со сформированными внутренними структурами, особенно с кластерами примесных атомов представляют большой научный и практический интерес. В таких материалах обнаружен ряд новых физических явлений вносящих большой вклад в развитие современной микро и наноэлектроники. В этом плане представляет особый интерес формирование кластеров примесных атомов редкоземельных элементов [6-9].

Актуальность работы связана с существованием ряда нерешенных вопросов с точки зрения разработки технологии формирования кластеров примесных атомов редкоземельных элементов с управляемой структурой и свойствами в решетке кремния, что является одной из актуальных и перспективных задач современной наноэлектроники. Создание кластеров примесных атомов редкоземельных элементов в кремнии позволяет не только управлять фундаментальными параметрами кремния, его магнитными свойствами, но и выявляет ряд новых еще неизвестных физических явлений в нем, применение которых открывает новые возможности для создания приборных структур с уникальными техническими характеристиками.

Методы исследования

Методами микронзондового анализа (установка Jeol Super Probe JXA-8800 R/RL), ИК-микроскопии (ИНФРАМ-И), а также АСМ (Dimension 3000) было исследовано образование кластеров атомов гадолиния, изменение их структуры, размера и плотности.

Электрофизические параметры образцов были измерены используя четырехзондовый метод и метод эффекта Холла. На основе теоретических расчетов, определены концентрации введенных примесных атомов участвующих в кластерообразовании.

Состояние примесных атомов гадолиния в объеме кристаллической решетке кремния было исследовано при помощи инфракрасного микроскопа ИНФРАМ-И. Инфракрасный микроскоп ИНФРАМ-И дает возможность наблюдать не только поверхность образца кремния, но и рассмотреть все его слои, т.е. дает возможность исследовать образец по всему объему.

Для измерения время жизни неосновных носителей заряда использовалась методика переходных процессов синусоидального тока большой амплитуды. Выбор такой методики диктовался тем, что используемый материал $\text{Si}\langle\text{P,Gd}\rangle$, а также контрольные образцы изменяли свое удельное сопротивление в достаточно широком интервале при термообработках, поэтому использование стандартных импульсных методов затрудняло получение достоверной информации. Ошибка проведенных измерений составляла не больше чем 5 %.

Результаты и их обсуждение

В качестве исходного материала использовался монокристаллический кремний марки КЭФ и КДБ как n- так и p-типа проводимости, выращенный методом Чохральского, где концентрация остаточного кислорода составляла $6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, с удельным сопротивлением в интервале $\rho \sim 1 \div 100 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Толщина образцов исходного кремния составляла 380 мкм. В качестве легирующих примесных атомов был использован гадолиний. Легирование образцов проводилось в вакуумированных откаченных кварцевых ампулах из тонкого металлического слоя, напыленного в вакууме на поверхность кремниевых образцов. В



отдельных ампулах в аналогичных условиях отжигались контрольные образцы кремния не содержащие атомов гадолиния, что бы оценить влияние диффузионного отжига на электрофизические параметры образцов. Механическая и химическая обработка всех образцов проводилась в идентичных условиях.

Рассматривая кластеры примесных атомов гадолиния можно отметить, что это не просто случайное накопление определенного числа атомов некоторой примеси где-то в решетке. Это локальная область полупроводника, обогащенная примесными атомами, которая имеет, как правило, четко выраженную структуру с упорядоченным расположением как примесей, так и основных атомов решетки. Примесные атомы в кластере сами входят в подрешетку с определенным расположением атомов и ионов, коррелированную с решеткой полупроводника, что и объясняет их относительно высокую устойчивость.

Под действием внешних воздействий кластеры примесных атомов могут менять своё состояние. Поиск способов управления состоянием кластеров и их упорядочением в кристаллической решетке полупроводника представляет большой научный и практический интерес. Это связано не только с возможностью создания объемно нано структурированного полупроводникового материала, но и получения новых типов фотонных материалов и объемных сверх решёток с заданными параметрами. Исследование полупроводниковых материалов с упорядоченным распределением кластеров примесных атомов в целом позволяет определить их уникальные функциональные возможности.

Суть разработанной нами «низкотемпературной диффузии» заключается в следующем [10]. Исследуемые образцы и диффузانت

находятся в откаченных кварцевых ампулах (давления в ампуле $\sim 10^{-6}$ мм.рт.ст). Они помещаются в диффузионную печь при $T=300\text{K}$. Заранее установлено, что температура печи в месте нахождения ампулы постепенно увеличивается со скоростью 5 град/мин. Далее образцы нагреваются до температуры $T=(550\div 700^{\circ}\text{C})$ и выдерживаются при этой температуре в течении $t=(10\div 20)$ мин, затем температура печи достаточно быстро поднимается (150÷200 град/мин) до определенной температуры ($T=1200\div 1250^{\circ}\text{C}$) и при этой температуре образцы выдерживаются необходимое время, после чего ампулы вынимаются из печи и охлаждаются со скоростью $200^{\circ}/\text{сек}$.

В возможностях, правильности и достоверности предлагаемой технологии легирования можно удостовериться, при получении положительных ответов на следующие вопросы:

- 1) Успевают ли примесные атомы диффундировать на необходимую глубину образца и какова эта глубина.
- 2) Достаточно ли концентрации внедренных атомов примеси, чтобы они оказали существенное влияние на свойства образца.
- 3) Каковы поверхностное и приповерхностное состояние образцов после диффузии, воспроизводимость и эффективность данной технологии.
- 4) Технология должна позволять формировать кластеры примесных атомов в решетке кремния и давать стабильность состояния таких кластеров.

Ответы на эти вопросы были получены экспериментально:

- 1) По новой технологии проводили десятки раз диффузию. После каждой диффузии было получено от 5 до 7 образцов, поверхность которых исследовалась ИК-микроскопом. Также была проведена диффузия обычным способом. Как показали результаты исследования, в



отличии от образцов, полученных обычным способом, в образцах полученных по новой технологии не было обнаружено эрозии поверхности, образование сплавов и силицидов, как на поверхности, так в при поверхностной области.

2) Для определения глубины проникновения примесей в процессе диффузии проведено исследование удельного сопротивления образцов 4^x зондовым методом по толщине образцов, а также концентрации носителей заряда и подвижности методом эффекта Холла.

На основании полученных результатов, можно утверждать, что в области низких температур, диффузия действительно происходит по междоузлиям, а примесные атомы находятся в междоузельных состояниях. Дополнительным доказательством этого предположения может служить то, что при низкотемпературной диффузии, рассчитанная концентрация вакансий будет $N_v \sim 10^7 \text{ см}^{-3}$, т.е почти на 7-8 порядков меньше чем концентрация примесных атомов в междоузлиях.

Одним из важных выводов, из этих экспериментальных результатов является то, что механизм диффузии и понятие растворимости примесных атомов в условиях низкотемпературной диффузии существенно отличаются от диффузии при высоких температурах, и полученные при этом основные диффузионные параметры и растворимость требуют существенной корректировки.

Как показали проведенные эксперименты, по новой технологии, кроме перечисленной выше научной новизны, также имеется ряд важных

практических моментов: по новой технологии, время диффузионного процесса сокращается в 2-2,5 раза, расход электроэнергии для проведения диффузии уменьшается в 2 раза, образование различных сплавов, силицидов, как на поверхности, так в при поверхностной области и эрозия поверхности практически полностью исключаются. Все перечисленные преимущества нового метода позволяют не только упростить технологию получения образцов, но и формировать кластеры примесных атомов.

После полировки поверхности образцов, состояние кластеров атомов гадолия было исследовано на инфракрасном микроскопе "ИНФРАМ-И". Чтобы убедиться, что формирование кластеров происходит по всему объёму кристалла, образцы подвергались поэтапно шлифовке, начиная с поверхности кристалла в глубь по 5 мкм до половины толщины образца и каждый раз образцы снова полировались и исследовались на ИК-микроскопе.

Как показали результаты ИК-микроскопических исследований во всех образцах независимо от типа и концентрации исходных примесных атомов наблюдаются равномерно распределённые темные точки кластеры атомов гадолия размером $d=2\div 15$ мкм. На рис. 1 приведена микрофотография образца кремния, в который проводилась диффузия гадолия по обычной высокотемпературной диффузионной технологии. Как видно из рисунка в образце легированном гадолинием по обычной технологии кластерообразование не происходит.

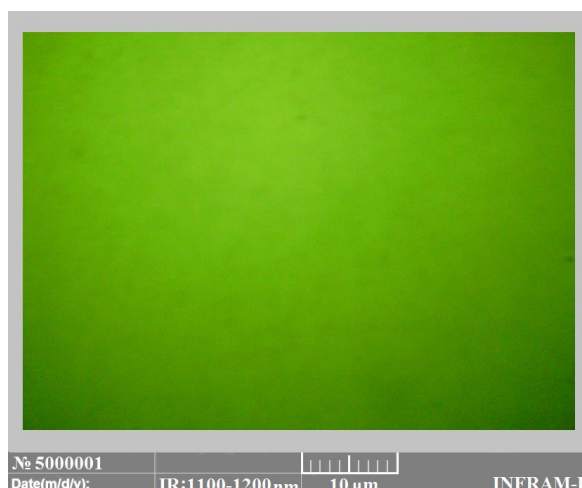


Рис 1. Микрофотография объема образца кремния, в который проводилась диффузия гадолиния по обычной высокотемпературной диффузионной технологией

Микрофотография поверхности гадолинием поэтапной
образца кремния легированной низкотемпературной диффузии
приведена на рисунке 2.



Рис. 2. Микрофотография образца кремния легированного гадолинием поэтапной низкотемпературной диффузией

Нами было установлено, что при поэтапной низкотемпературной диффузии температура и время диффузии влияет не только на глубину проникновения примеси, но и на размеры формирующихся кластеров, а

также может стать причиной их не формирования. На рис. 3 изображена микрофотография образца кремния полученного двух стадийной диффузией гадолиния при относительно низких конечных температурах и времени выдержки.

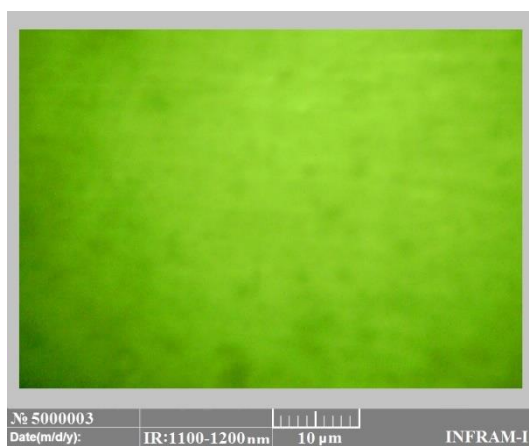


Рис. 3. Микрофотография образца кремния полученного двух стадийной диффузией гадолия при относительно низких конечных температурах и времени выдержки

Как видно, количество образовавшихся кластеров очень мало, а также малы их размеры, которые составляют порядка сотен нанометров. При дальнейшем увеличении количества этапов диффузии, их продолжительности и температуры получены крупные кластеры

примесных атомов гадолия размером в несколько микрон, равномерно распределенные по объему образца. Интересные результаты были получены при трехстадийной диффузии. При этом образовывались кластеры с участием дефектов кристаллической решетки кремния (рис.4).



Рис. 4. Микрофотография образца кремния полученного трехстадийной диффузией гадолия при относительно высоких конечных температурах и длительных временах выдержки

Определено, что при толщине образца кремния в 380 мкм гадолий проникает на глубину 60 мкм от поверхности, а кластеры образовались в слое толщиной 50 мкм и были распределены равномерно по всей толщине. Исследование влияния низкотемпературных обработок на размеры и распределение кластеров показало, что при отжиге в интервале

температур $600 \div 800^{\circ}\text{C}$ наблюдается упорядочение и укрупнение кластеров примесных атомов гадолия.

С целью оценки использования кластеров атомов, гадолия для создания эффективных солнечных элементов, необходимо иметь информацию об их влиянии на время жизни неосновных носителей заряда. Такие исследования также



представляют интерес для выявления состояния кластеров атомов, гадолиния в матрице и их взаимодействия с другими примесными атомами и дефектами. Поэтому нами для исследования времени жизни неосновных носителей заряда был выбран кремний легированный гадолинием с концентрацией $N_{Gd} \approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Образцы после каждого этапа термообработки, в идентичных условиях подвергались обработке в полирующем травителе, что позволяло

снять с поверхности окисные слои и другие дефекты, которые появляются в процессе термообработки.

На рис. 5 представлены зависимости времени жизни неосновных носителей заряда от времени отжига при $T=1000 \text{ }^\circ\text{C}$ для образцов $\text{Si}\langle\text{P},\text{Gd}\rangle$ и контрольных образцов. Относительное изменение удельного сопротивления материала $\text{Si}\langle\text{P},\text{Gd}\rangle$ ($N_{Gd}=10^{17} \text{ см}^{-3}$) от времени дополнительного термоотжига при $T=500 \text{ }^\circ\text{C}$ приведено на рис. 6.

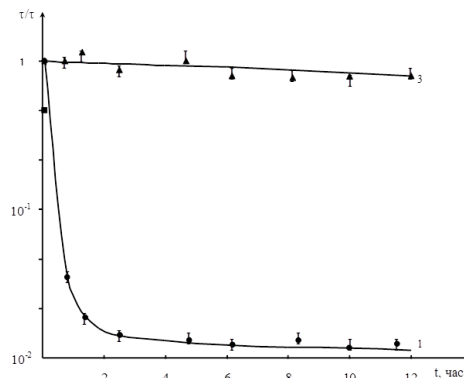


Рис. 5. Зависимость времени жизни неосновных носителей заряда от времени термоотжига, $T=1000 \text{ }^\circ\text{C}$. 1- $\text{Si}\langle\text{P}\rangle$; 2- $\text{Si}\langle\text{P},\text{Gd}\rangle$

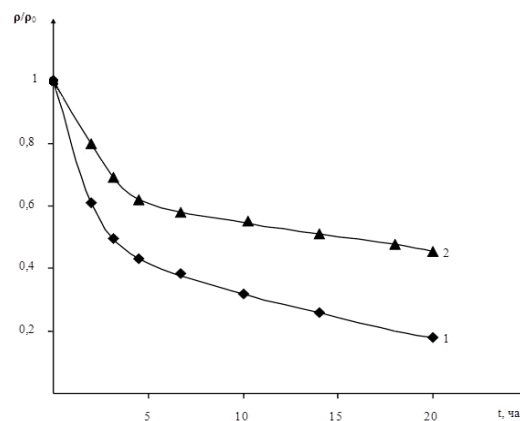


Рис. 6. Относительное изменение удельного сопротивления материала от времени дополнительного термоотжига при $T=500 \text{ }^\circ\text{C}$. Образцы: 1- исходные $\text{Si}\langle\text{P}\rangle$; 2- $\text{Si}\langle\text{P},\text{Gd}\rangle$ ($N_{Gd}=10^{17} \text{ см}^{-3}$)

В таблице 1 приведены значения τ для образцов в зависимости от температуры отжига. При этом время отжига составляет $t = 5$ часов. Как видно из таблицы 1 в образцах $\text{Si}\langle\text{P},\text{Gd}\rangle$ время жизни неосновных носителей заряда в широком интервале температур является достаточно стабильным. Следует отметить, что в

образцах $\text{Si}\langle\text{P},\text{Gd}\rangle$ даже наблюдается увеличение τ по сравнению с исходными значениями. Эти результаты показывают, что наличие примесных атомов гадолиния практически полностью подавляет генерацию рекомбинационных центров, которые всегда существуют, и генерируются в монокристаллах при термообработке.



Установлено, что образцы Si<P,Gd> обладают повышенной радиационной стойкостью.

Таблица 1
Зависимость времени жизни неосновных носителей заряда от температуры отжига

Образцы	Температура отжига, °С.				Время отжига, час
	1000	1100	1150	1200	
	τ, мкс	τ, мкс	τ, мкс	τ, мкс	
Si<P,Gd>	15-20	20-30	25-40	25-35	5
Si<P,Gd>	17-25	17-35	20-35	20-40	5
Si<P,Gd>	16-20	14-25	25-40	20-40	5
Si<P,Gd>	15-25	16-30	20-40	25-40	5
Si<P,Gd>	10-20	20-30	22-38	20-40	5
Si<P>	менее 1 мкс	менее 1 мкс	менее 1 мкс	менее 1 мкс	5
Si<P>	менее 1 мкс	менее 1 мкс	менее 1 мкс	менее 1 мкс	5
Si<P>	менее 1 мкс	менее 1 мкс	менее 1 мкс	менее 1 мкс	5

Как видно из рисунка 6, время жизни неосновных носителей заряда для всех типов материалов до термообработки были примерно одного порядка (16-32 мкс), время жизни неосновных носителей тока в контрольных образцах резко уменьшается, при термообработке в течение 1÷1,5 часа до единиц мкс. В конце термообработки τ становится менее одной микросекунды. В то же время в образцах время жизни неосновных носителей тока в образцах Si<P,Gd> практически остается

постоянным для всех времен термообработки.

В таблице 2 приведено изменение электрофизических параметров образцов Si<P,Gd> до и после γ-облучения с дозой 10^9 Р.

Таким образом, можно сказать, что кремний легированный гадолинием, достаточно хорошо стабилизирует время жизни неосновных носителей тока при дополнительных термоотжигах, а также обладает повышенной радиационной стойкостью при γ-облучении.

Таблица 2
Изменение электрофизических параметров образцов при γ-облучении с дозой 10^9 Р

Образцы	До облучения		После облучения		
	ρ, Ом·см	n, см ⁻³	ρ/ρ ₀	n/n ₀	K _n =(n ₀ -n)/Φ
Si<P>	18,3	$2,4 \cdot 10^{14}$	$2,9 \cdot 10^{-3}$	$4,9 \cdot 10^{-4}$	$5,2 \cdot 10^{-5}$
Si<P>	18,8	$2,6 \cdot 10^{14}$	$3,05 \cdot 10^{-3}$	$4,6 \cdot 10^{-4}$	$5,6 \cdot 10^{-5}$
Si<P>	20,2	$2,36 \cdot 10^{14}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$3,8 \cdot 10^{-4}$	$5,9 \cdot 10^{-5}$
Si<P>	21,7	$2,2 \cdot 10^{14}$	$3,36 \cdot 10^{-3}$	$3,4 \cdot 10^{-4}$	$6,06 \cdot 10^{-5}$
Si<P>	23,1	$2,15 \cdot 10^{14}$	$3,56 \cdot 10^{-3}$	$3,6 \cdot 10^{-4}$	$6,1 \cdot 10^{-5}$
Si<P>	24	$2,0 \cdot 10^{14}$	$3,7 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$6,23 \cdot 10^{-5}$
Si<P,Gd>	22,3	$2,1 \cdot 10^{14}$	1,3	$7,43 \cdot 10^{-1}$	$1,27 \cdot 10^{-5}$



Si<P,Gd>	22,4	$2,15 \cdot 10^{14}$	1,36	$7,35 \cdot 10^{-1}$	$1,32 \cdot 10^{-5}$
Si<P,Gd>	22,5	$2,2 \cdot 10^{14}$	1,42	$7,3 \cdot 10^{-1}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$
Si<P,Gd>	22,6	$2,25 \cdot 10^{14}$	1,4	$7,1 \cdot 10^{-1}$	$1,35 \cdot 10^{-5}$
Si<P,Gd>	22,8	$2,3 \cdot 10^{14}$	1,405	$7,05 \cdot 10^{-1}$	$1,39 \cdot 10^{-5}$
Si<P,Gd>	22,9	$2,3 \cdot 10^{14}$	1,41	$7,0 \cdot 10^{-1}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$

Положительный эффект дополнительного легирования гадолинием заключается в том, что всякий термоотжиг, который вызывает генерацию термодоноров и нежелательную активацию примесных атомов, приводит кластеры атомов гадолиния к стремлению снять поле напряжений и привести систему к равновесному состоянию, т.е. к увеличению энтропии системы. Подтверждением этого могут служить результаты дополнительных экспериментов проведенных в нашей лаборатории по инфракрасному микроскопическому исследованию распределения атомов никеля в кремнии легированного гадолинием.

Было установлено, что при термообработке в образцах Si<P,Gd> атомы никеля четко осаждаются вокруг полей напряжения кластеров атомов гадолиния. Поэтому стабильность параметров Si (ρ и τ) легированного гадолинием при термообработке объясняется активным захватом дефектов и примесных атомов кластерами атомов гадолиния.

Полученные экспериментальные данные показывают, что атомы гадолиния, находящиеся в междоузельных нестабильных состояниях в решетке, в процессе низкотемпературного легирования стремятся к более энергетически выгодному т. е. к квазиравновесному состоянию, т.е. взаимодействуют с образованием кластера. При этом кристалл избавляется от одиночных атомов гадолиния, а система переходит в наиболее энергетически выгодное состояние. Формирование и взаимодействие кластеров, за счет атомов гадолиния, существенно

снимает деформационное напряжение в кристалле. При этом основным стимулятором являются как атомы кислорода, так и другие дефекты решетки, соответственно образование кластеров примесных атомов гадолиния обладает сильным геттерирующим эффектом существенно снижающим концентрацию неконтролируемых загрязняющий кристалл примесей и подавляет образование термодоноров.

Заключение

Разработана технология поэтапной низкотемпературной диффузии гадолиния в кремний, позволяющая создать кластеры примесных атомов гадолиния равномерно распределенных по всему объему кристалла. Такие кластеры позволяют не только управлять свойствами полупроводникового материала, но и позволяют использовать такие материалы при разработке новых конструкций солнечных элементов. Результаты исследования поверхности образцов после диффузии показали, что в отличии от образцов, полученных высокотемпературным диффузионным легированием, в образцах полученных по новой технологии не было обнаружено эрозии поверхности, образование сплавов и силицидов в приповерхностной области. Установлено, что при поэтапной низкотемпературной диффузии температура и время диффузии влияет не только на глубину проникновения примеси, но и на размеры формирующихся кластеров.

Комплексное исследование физических свойств кремния содержащего упорядоченные кластеры примесных атомов гадолиния может



способствовать открытию новых физических явлений, которые не были обнаружены не только в легированных полупроводниковых материалах, но и в полупроводниках с наноструктурами. Управление состоянием и распределением кластеров примесных атомов гадолиния в кристаллической решетке кремния позволяет создать новый класс полупроводникового материала обладающего уникальными функциональными возможностями, а также создать на его основе новый класс приборов для оптоэлектроники, микроэлектроники и солнечной энергетики. Анализ проведенных исследований и полученных результатов по формированию кластеров примесных атомов гадолиния показал, что возможно перемещение полученных кластеров в нужное место.

Установлено, что образцы $\text{Si}\langle\text{P,Gd}\rangle$ обладают повышенной термо- и радиационной стойкостью. Кремний легированный гадолинием, достаточно хорошо стабилизирует время жизни неосновных носителей тока при дополнительных термоотжигах, а также обладает повышенной радиационной стойкостью при γ -облучении. Можно сделать вывод, что образование кластеров примесных атомов гадолиния обладает сильным геттерирующим эффектом.

Литература

1. Суздалев И.П. Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. М. Ком Книга, 2006. 592с.
2. Bakhadyrhanov M. K., Sodikov U. X., Melibayev D., Wumaier Tuerdi, Koveshnikov S. V., Khodjanepesov K. A., Jiangxiang Zhan Silicon with Clusters of Impurity Atoms as a Novel Material for Optoelectronics and Photovoltaic Energetics // Journal of Materials Science and Chemical Engineering, 2018, 6, 180-190.
3. Баграев Н.Г., Романов В.В. Магнетизм кристаллов $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$, легированных редкими элементами. ФТП, 2005, Т.39, в.10, стр.1173-1182.
4. Абдурахманов Б.А., Эгамбердиев Б.Э., Илиев Х.М., Тачилин С.А., Тошев А.Р. «Влияние микрогетеропереходов кремний - германий на параметры кремниевых солнечных элементов» // Журнал «Электронная обработка материалов», Молдавия, 2010, № 5, с. 124-126.
5. Egamberdiev B.E., Iiev Kh.M., Nasriddinov S.S., Toshev A.R., Zoirova M.E. Photoelectric properties of silicon-based solar cells implanted with rare earth elements. //Conference. Russia, Vladivostok, 2006. PP. 204-208.
6. Бахадырханов М.К., Илиев Х.М., Хамидов А., Тошев А.Р. «Деградиационные свойства кремниевых солнечных элементов с редкоземельными примесями» // Гелиотехника 2002 г., №3, стр. 19-22.
7. Эгамбердиев Б.Э., Илиев Х.М., Тачилин С.А., Тошев А.Р. «Радиационная стабильность кремниевых солнечных элементов легированных гольмием»// XI Международной конференции «Физика твердого тела» Усть-Каменогорск, Казахстан, 9-12 июня 2010 г.
8. Далиев Х.С., Дехканов М.Ш., Эруглиев У.К., Норкулов Ш.Б., Эргашев Ж.А. Емкостная спектроскопия дефектов в кремнии, легированном атомами гадолиния // Физика полупроводников и микроэлектроника. 1 (01). 2019. С. 15-17.
9. Далиев Х.С., Утамурадова Ш.Б., Далиев Ш.Х., Дехканов М.Ш., Норкулов Ш.Б. О влиянии диспрозия на процессы радиационного



- дефектообразования в кремнии // Uzbek Journal of Physics. Vol. 20 (№2). 2018. pp. 131-133.
10. Аюпов К.С., Бобонов Д.Т., Зикриллаев Н.Ф., Сапарниязова

З.М., Тошев А.
низкотемпературная диффузия
примесей в кремнии // Доклады
АН РУз. – Ташкент, 2010. – № 4.–
С. 34-38.