

## КЛАСТЕРЫ АТОМОВ ПРИМЕСИ НИКЕЛЯ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА РЕКОМБИНАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА КРЕМНИЯ

С.З. Зайнабидинов  
А.О. Курбанов

prof\_sirojiddin@mail.ru  
qurbonov26@yahoo.com

Андижанский государственный университет, Андижан, Республика Узбекистан

---

### Аннотация

Методом нестационарной емкостной спектроскопии (*DLTS*), измерением удельного сопротивления, концентрации и времени жизни носителей заряда, а также с использованием инфракрасного и атомно-силового микроскопов *Solver-NEXT* определены типы и природа структурных дефектов кремния *n*-типа с кластерами примесных атомов никеля. Установлено, что после высокотемпературной диффузии в медленно охлажденных образцах  $\text{Si}\langle\text{Ni}\rangle$  наблюдаются звездообразные дефекты. Отсутствие декорирования дислокаций в быстро охлажденных образцах  $\text{Si}\langle\text{Ni}\rangle$  связано с образованием точечных дефектов типа  $[\text{Ni}-\text{O}]$ , силицидов  $[\text{Ni}-\text{Si}]$  и пар атомов  $\text{Ni}[\text{Ni}_i-\text{Ni}_i]$  (в отличие от легированных медленно охлажденных образцов  $\text{Si}\langle\text{Ni}\rangle$ ). Различия формы и размеров образующихся дефектов в быстро и медленно охлажденных образцах  $\text{Si}\langle\text{Ni}\rangle$  можно объяснить тем, что при медленном охлаждении переход системы к равновесному состоянию сопровождается понижением свободной энергии, и атомы никеля, постепенно осаждаваясь на нарушениях кристаллической решетки, образуют включения с наиболее энергетически выгодным состоянием — звездообразные дефекты. Установлено увеличение времени жизни носителей заряда, обусловленное образованием уровня прилипания, связанного с комплексом  $[\text{Ni}-\text{O}]$  в кремнии

### Ключевые слова

*Кремний, никель, кислород, кластер, комплекс, время жизни, рекомбинационные свойства*

Поступила 17.04.2018  
© Автор(ы), 2019

---

**Введение.** Применение полупроводниковых кристаллов, в частности кремния, легированных быстро диффундирующими примесями, для изготовления изделий микроэлектроники в значительной степени зависит от наличия дефектов в исходном материале. Основными дефектами в монокристаллах кремния являются дислокации, микродефекты, скоп-

ления примесных атомов в виде кластеров, преципитатов и др. [1]. Наличие таких дефектов в пластинах кремния может привести к ухудшению характеристик изготавливаемых приборов вплоть до их выхода из строя. Поэтому выявление этих дефектов в кристаллах, определение их структуры, свойств, размеров и концентрации имеет важное практическое значение. Несмотря на публикации, посвященные изучению электрофизических, рекомбинационных и фотоэлектрических свойств легированного примесями никеля кремния [2, 3], до сих пор не изучено формирование в этих материалах различных структурных дефектов и их перестройка при внешних воздействиях.

Применением высокотемпературной диффузии с последующим резким охлаждением можно получить нанокластеры примесных атомов [4, 5]. При этом изменяя температуру диффузии в пределах 750...1050 °С и скорость охлаждения, можно управлять размерами нанокластеров в диапазоне значений 10...900 нм. Исходя из этого, в настоящей работе изучено влияние температуры диффузионного и изохронного отжига, а также скоростей охлаждения на формирование кластеров атомов никеля в кремнии.

**Методика эксперимента.** Кремниевые образцы  $n$ -Si<P> с плотностью дислокаций около  $10^4 \text{ см}^{-2}$  и с содержанием кислорода примерно  $10^{17} \text{ см}^{-3}$ , выращенные по методу Чохральского, с  $\rho \approx 3 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  вырезались в форме параллелепипеда. До легирования образцы подвергались механической и химической обработкам по стандартным технологиям. Для осуществления диффузии никеля на очищенную поверхность образцов в вакууме напылялся металлический никель чистотой 99,99 %.

Легирование образцов кремния никелем осуществлялось термодиффузионным способом в горизонтальной печи в кварцевых ампулах при температуре 1050...1300 °С в открытом объеме в течение 5 ч. Температура диффузии контролировалась платина-платинородиевой термопарой. Диффузионное охлаждение осуществлялось с различной скоростью:

- 1) медленное охлаждение в печи со скоростью  $v_{\text{охл}} \approx 30...40 \text{ град/мин}$  — образцы I типа;
- 2) быстрое охлаждение на воздухе со скоростью  $v_{\text{охл}} \approx 250...300 \text{ град/мин}$  — образцы II типа.

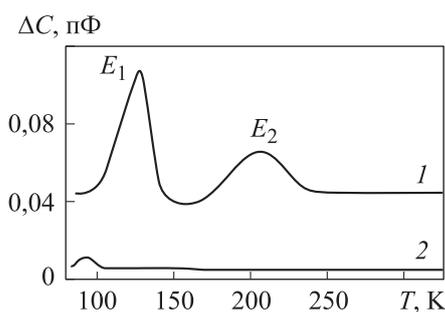
Для учета влияния термической обработки проводился отжиг контрольных образцов при тех же условиях без примеси никеля. Перед исследованием свойств для удаления поверхностного нарушенного слоя кремния со всех сторон образцов снимались приповерхностные области толщиной примерно 50 мкм.

Структурные дефекты в полученных образцах Si<Ni> исследовались с использованием инфракрасного микроскопа, поверхность образцов — промышленным атомно-силовым микроскопом (АСМ) *Solver-NEXT*, позволяющим измерять рельеф поверхности и распределение потенциала по поверхности. Электрические и рекомбинационные свойства определялись измерением удельного сопротивления  $\rho$ , концентрации носителей заряда  $n$  методом эффекта Холла и времени жизни неосновных носителей заряда методом стационарной фотопроводимости. Для определения энергии залегания уровней и концентрации примесно-дефектных центров использован метод нестационарной емкостной спектроскопии (DLTS) [6].

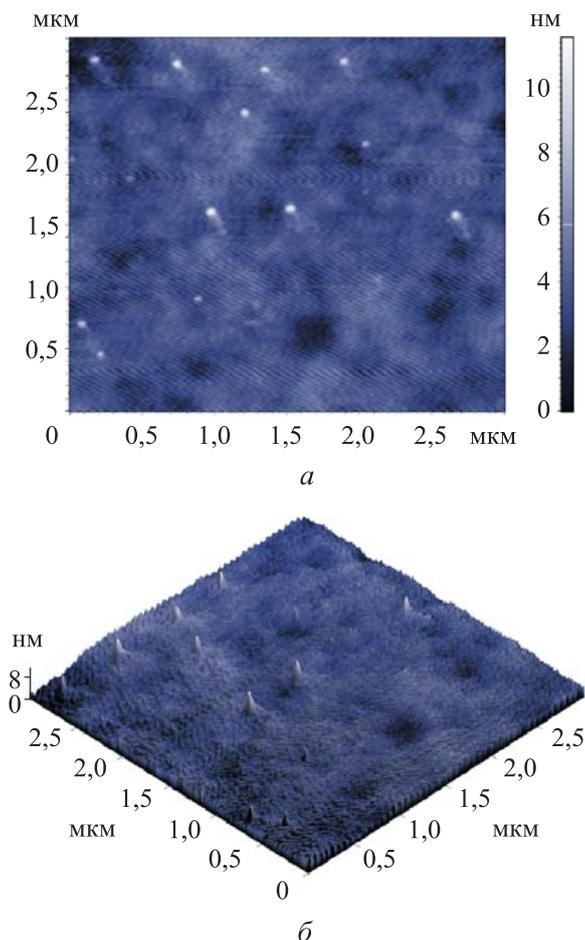
**Экспериментальные результаты и их обсуждение.** В спектрах DLTS  $n$ -Si<P, Ni> образцов II типа (рис. 1) наблюдаются два максимума  $E_1 = E_c - (0,22 \pm 0,02)$  эВ ( $\sigma_n = 5 \cdot 10^{-15}$  см<sup>2</sup>) и  $E_2 = E_c - (0,42 \pm 0,02)$  эВ ( $\sigma_n = 8 \cdot 10^{-16}$  см<sup>2</sup>) после термодиффузии при температуре 1280 °С. Следует отметить, что концентрация обнаруженных энергетических уровней составляет не более  $3 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup> и зависит от температуры диффузии и скоростей последидиффузионного охлаждения. В  $n$ -Si<P, Ni> образцах I типа концентрация этих уровней в 5–10 раз меньше, чем в образцах II типа. Указанные энергетические уровни не обнаружены в контрольных образцах. Это означает, что возникновение этих центров возможно связано с комплексами типа никель–неконтролируемая примесь.

Далее изучены структура, размеры и распределение примесных дефектов в кремнии, легированном никелем. Результаты исследования морфологии рельефа поверхности образца  $n$ -Si<P, Ni>, полученные с использованием АСМ, приведены на рис. 2. В поверхностной области  $n$ -Si<P, Ni> (рис. 2, б) формируются островки высотой  $h \approx 8$  нм и шириной  $d \approx 30$  нм. Такие островки образуются из компонентов твердого раствора  $n$ -Si<P, Ni> и являются квантовыми точками.

Данные, полученные с использованием АСМ, показывают, что наноструктуры никеля в твердом растворе  $n$ -Si<P, Ni> имеют геометрическую



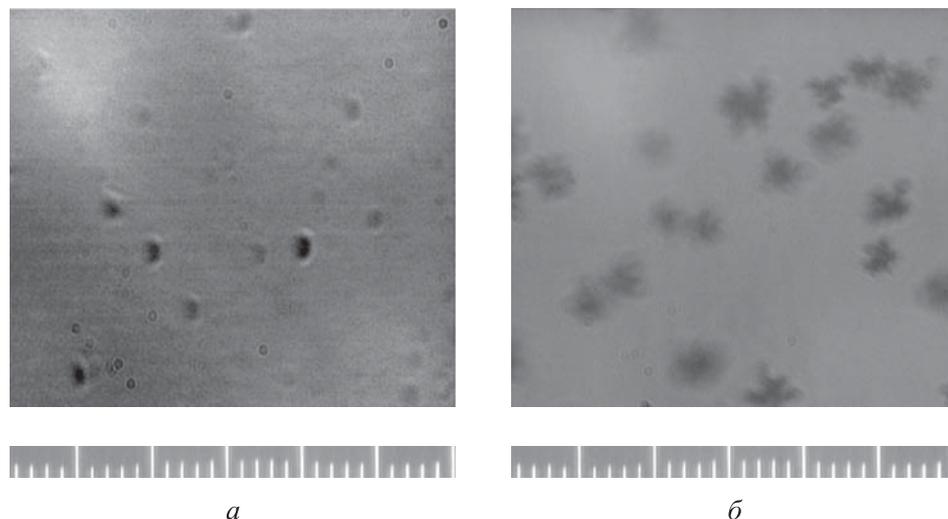
**Рис. 1.** Спектр DLTS  $n$ -Si<P, Ni> образцов II типа (1) и контрольного кремния II типа (2) ( $T_{\text{диф}} = 1170$  °С),  $E_1 = E_c - (0,22 \pm 0,02)$  эВ,  $E_2 = E_c - (0,40 \pm 0,02)$  эВ



**Рис. 2.** Двумерное (а) и трехмерное (б) изображения поверхности  $n\text{-Si}\langle\text{P, Ni}\rangle$  образца II типа

форму купола, т. е. так называемые *dome* — островки с характерным латеральным размером 30...60 нм с круглым основанием (см. рис. 2, б). Появление таких форм никелевых наностроек обычно объясняется сильной релаксацией упругих напряжений в конфигурации *dome*-фазы. Согласно данным, приведенным в работе [7], эти нанокластеры называются *hut*-кластерами с латеральными размерами 15...25 нм, они поглощаются *dome*-кластерами. Такой процесс часто сопровождается бимодальным распределением островков по размерам, отвечающим сосуществованию *hut*- и *dome*-фазам.

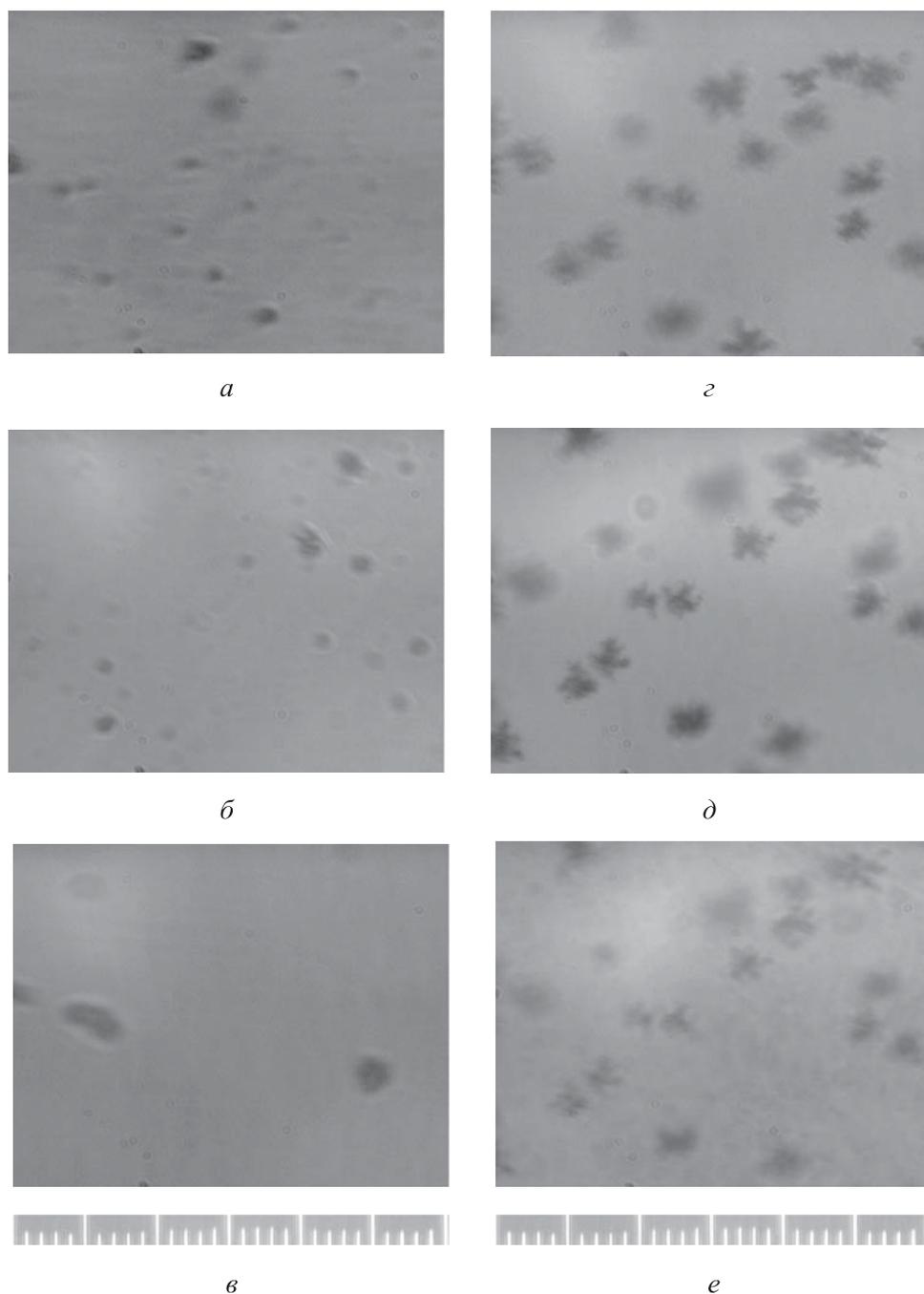
Микрофотографии образцов  $\text{Si}\langle\text{Ni}\rangle$ , в которых наблюдаются звездчатые дефекты, представляющие собой многочисленные взаимосвязанные кластеры атомов никеля вида шести- и четырехлепестковых розеток, приведены на рис. 3. Размеры этих кластеров достигают 10...15 мкм,



**Рис. 3.** Микрофотографии образцов легированного никелем кремния I (*a*) и II (*б*) типов (внизу показана микрометрическая шкала с шагом 10 мкм)

они распределены по объему кристалла в виде цепочек. Эксперименты показывают, что вид и характер распределения этих структурных дефектов в легированном кремнии играют определяющую роль в формировании электрофизических свойств легированного кремния при внешних воздействиях. Например, с уменьшением размеров кластеров повышается температурная и радиационная стабильность электрофизических параметров Si<Ni> [5].

Далее исследовалось влияние термической обработки в диапазоне значений 300...1050 °С с шагом 50 °С с в течение 30 мин при каждом значении температуры на характер дефектов в образцах Si<Ni>. Установлено, что в быстро охлажденных образцах образуются только включения круглой формы, однако их плотность мала (рис. 4, *a*), а в медленно охлажденных образцах (рис. 3, *a*, рис. 4, *г*) формируются кластеры атомов никеля в виде шести- и четырехлепестковых розеток. Термическая обработка вплоть до температуры 1050 °С практически не влияет на характер и размер включений в медленно охлажденных образцах (рис. 4, *д*, *e*). В быстро охлажденных образцах при отжиге до температуры 600 °С характер и размер включений не изменяется (рис. 4, *б*), а при температуре 1050 °С плотность дефектов уменьшается, однако их размер увеличивается (рис. 4, *в*). Различия формы и размеров образующихся дефектов в быстро и медленно охлажденных образцах Si<Ni> можно объяснить тем, что при медленном охлаждении переход системы к равновесному термодинамическому состоянию сопровождается понижением свободной



**Рис. 4.** Микрофотографии образцов легированного никелем кремния с последующим быстрым (*а–в*) и медленным (*г–е*) охлаждением до (*а, г*) и после термической обработки при температуре 550 (*а, г*) и 1050 °С (*б, д*) (внизу приведена микрометрическая шкала с шагом 10 мкм)

энергии, и атомы никеля, постепенно осаждаюсь на нарушениях кристаллической решетки, образуют включения с наиболее энергетически выгодным состоянием, например звездообразные дефекты (см. рис. 4, а). Полученные результаты (см. рис. 1–4) свидетельствуют о том, что образование электрически активных центров при легировании кремния никелем зависит от скорости последиффузионного охлаждения и низкотемпературной обработки.

В результате исследований экспериментально обнаружена зависимость размеров дефектных образований от температуры отжига в образцах II типа (см. рис. 3) и уход атомов никеля от насыщенной примесью дислокации в объем легированного кремния, который можно связать с распадом пересыщенного твердого раствора Si–Ni в процессе последиффузионного охлаждения. В отличие от легированных образцов I типа отсутствие декорирования дислокаций атомами никеля в легированном кремнии II типа связано с образованием точечных дефектов типа [Ni–O] [8], силицидов [Ni–Si] и пар атомов Ni [Ni<sub>s</sub>–Ni<sub>i</sub>].

Исследовалось влияние концентрации атомов никеля на время жизни неосновных носителей заряда  $n$ -Si<P, Ni> в образцах I и II типов, результаты которых приведены в таблице. Анализ результатов показывает, что значения времени жизни неосновных носителей заряда, во-первых, больше в  $n$ -Si<P, Ni>, чем в контрольном образце кремния, во-вторых, с ростом концентрации атомов никеля время жизни неосновных носителей заряда незначительно увеличивается.

**Время жизни неосновных носителей заряда в легированном и контрольном образцах кремния при быстром и медленном охлаждении (I и II тип)**

Тип образцов	$T_{\text{диф}}$ , °C					
	1070		1120		1170	
	I	II	I	II	I	II
$n$ -Si<P> ( $\rho_{\text{и}} = 3 \Omega \text{ см}$ )	$1 \cdot 10^{-6}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$
$n$ -Si<P, Ni> ( $\rho_{\text{и}} = 3 \Omega \text{ см}$ )	$3 \cdot 10^{-6}$	$3,7 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$5,6 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-6}$

Если концентрация сформированных рекомбинационных центров в кремнии меньше концентрации уровней прилипания, то общее время жизни неосновных носителей заряда повышается и определяется уровнями прилипания. Возможно увеличение времени жизни неосновных носителей заряда в легированных образцах по сравнению с контрольным

(см. таблицу), что связано с возникновением уровня  $E_1$ , обусловленного точечным дефектом в кремнии, легированном никелем, т. е. с формированием дефектов типа [Ni–O] [8], которые создают уровни прилипания для носителей заряда. Кроме того, в процессе легирования кремния примесью никеля также возникают силициды [Si–O], которые снижают концентрацию кислородосодержащих рекомбинационных центров типа А-центра. Следует отметить, что в процессе охлаждения вероятность образования пары атомов Ni ( $Ni_s-Ni_i$ ) мала ввиду слабой энергии связи атома никеля в узле решетки. Поэтому максимальные наблюдаемые значения концентрации комплексов типа [V–Ni] не превышали  $3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ .

Для выяснения эффективности образования примесных и структурных дефектов с участием атомов никеля при различных значениях скорости охлаждения после диффузии в зависимости от концентрации вакансий и собственных межузельных дефектов, генерируемых при термомодиффузии, рассмотрим следующую систему кинетических уравнений:

$$\begin{aligned} dN_V/dt &= -k_1 N_I N_V - k_2 N_V N_{Ni} - N_V/\tau_V; \\ dN_I/dt &= -k_1 N_I N_V - k_3 N_{Ni} N_I - k N_I N_O - N_I/\tau_I; \\ dN_{Ni}/dt &= -k_2 N_V N_{Ni} - k_3 N_{Ni} N_I - k_4 N_{Ni} N_O - N_{Ni}/\tau_{Ni}; \\ dN_{[V-Ni]}/dt &= k_2 N_V N_{Ni}; \quad dN_{[Ni-Si]}/dt = k_3 N_{Ni} N_I; \\ dN_{[Ni-O]}/dt &= k_4 N_{Ni} N_O; \quad dN_{[Si-O]}/dt = k N_I N_O. \end{aligned}$$

Здесь  $t$  — время последиффузионного охлаждения и протекания квазихимических реакций;  $k_i$  — константы соответствующих реакций (в частности,  $k_1 = 1/N_{V(I)} \tau$ ,  $\text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ );  $1/\tau_i$  — вероятности ухода вакансий, межузельных атомов и атомов никеля на стоки [9]. Начальные условия: при  $t = 0$ ,  $N_V = N_V^0$ ,  $N_I = N_I^0$ ,  $N_{Ni} = N_{Ni}^0$ , где  $N_V$ ,  $N_I$ ,  $N_{Ni}$ ,  $N_O$  — концентрации вакансий, собственных межузельных атомов кремния (I), атомов никеля и атомов кислорода соответственно. Полагая, что  $N_I/\tau_I \gg [k_3 N_{Ni} N_I, k_1 N_I N_V, k N_I N_O]$ , получаем

$$N_I = N_I^0 \exp(-t/\tau_I).$$

Далее, если  $[k_1 N_I N_V] < [k_2 N_V N_{Ni}, k_3 N_I N_{Ni}]$ , то

$$N_V = N_V^0 \exp(-t/\tau'_V),$$

где  $1/\tau'_V = 1/\tau_V + k_2 N_{Ni}$ .

Полагая, что  $N_{Ni}/\tau_{Ni} > [k_2N_VN_{Ni}, k_3N_I N_{Ni}]$ , определяем

$$N_{Ni} = N_{Ni}^0 \exp(-t/\tau'_{Ni}),$$

где  $1/\tau'_{Ni} = 1/\tau_{Ni} + k_4N_O$ .

В результате имеем кинетику протекания квазихимических реакций для межузельных атомов никеля  $N_{Ni}(t)$ , зависящую от концентрации атомов кислорода, собственных межузельных атомов кремния и вакансий. Протекание реакции сильно зависит от концентрации элементов, участвующих в процессах взаимодействия. В рассматриваемом случае концентрация атомов кислорода  $N_O$  и общая концентрация никеля  $N_{Ni}$  составляют около  $10^{18} \text{ см}^{-3}$ , т. е. на 2–3 порядка выше, чем концентрация первичных термических дефектов (концентрация вакансий и межузельных атомов кремния при температуре  $1280 \text{ }^\circ\text{C}$  не превышает  $10^{15} \text{ см}^{-3}$ ). В связи с этим вероятность встречи атомов кислорода и никеля между собой и образования примесных комплексов намного выше, чем вероятность образования комплексов никеля с первичными термическими дефектами, возникающими в процессе охлаждения после высокотемпературной диффузии никеля в кремнии. Экспериментально доказано [1, 8, 10], что концентрация комплексов (вакансия–никель) не превышает значения  $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  (при температуре диффузии  $1280 \text{ }^\circ\text{C}$  и последующим быстрым охлаждением) при комнатной температуре. Совокупность этих предположений математически может быть описана как

$$(k_4 > k, k_1, k_3, k_2), N_{[Ni-O]} > N_{[Si-O]}, N_{[V-Si]}, N_{[V-Ni]},$$

т. е. концентрации кислородосодержащих дефектов  $[Ni-O]$  больше концентрации других комплексов, формирующихся после диффузионного охлаждения в  $n-Si\langle P, Ni \rangle$ .

Экспериментальные результаты по определению состояния примесных атомов и их кластеров, механизмов взаимодействия с дефектами кристаллической структуры кремния, приводящие к наблюдаемым эффектам в электрофизических и рекомбинационных свойствах легированных образцов, установление оптимальных технологических условий получения компенсированного кремния с заданными свойствами обеспечивают термическую стабильность параметров полупроводников и приборов на их основе.

**Заключение.** Выявлено, что при формировании кластеров атомов никеля в объеме кремния образуются звездообразные примесно-дефектные низкоразмерные композиции, имеющие слоистое распределение по плоско-

сти, перпендикулярной к направлению диффузии никеля. В зависимости от температуры отжига увеличение размеров примесно-дефектных низкоразмерных композиций может составлять от 10...15 до 30...40 мкм.

Установлено, что при легировании образцов кремния компенсирующими примесями с ростом концентрации кластеров атомов никеля время жизни неосновных носителей заряда увеличивается. Обнаруженный аномальный эффект объясняется образованием различных низкоразмерных дефектных структур в объеме кремния, обусловленных наноконпозициями типа примесь–кислород.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Фистуль В.И. Атомы легирующих примесей в полупроводниках. М., Физматлит, 2004.
- [2] Silva D.J., Wahl U., Correia J.G., et al. Drawing the geometry of 3d transition metal-boron pairs in silicon from electron emission channeling experiments. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B.*, 2016, vol. 371, pp. 59–62. DOI: 10.1016/j.nimb.2015.09.051
- [3] Vyvenko O.F., Buonassisi T., Istratov A.A. X-ray beam induced current — a synchrotron radiation based technique for the *in situ* analysis of recombination properties and chemical nature of metal clusters in silicon. *J. Appl. Phys.*, 2002, vol. 91, iss. 6, pp. 3614–3617. DOI: 10.1063/1.1450026
- [4] Riedel F., Schröter W. Electrical and structural properties of nanoscale NiSi<sub>2</sub> precipitates in silicon. *Phys. Rev. B*, 2000, vol. 62, iss. 11, pp. 7150–7156. DOI: 10.1103/PhysRevB.62.7150
- [5] Abdurakhmanov B.A., Bakhadir Khanov M.K., Ayupov K.S. Formation of clusters of impurity atoms of nickel in silicon and controlling their parameters. *Nanosci. Nanotechnol.*, 2014, vol. 4, no. 2, pp. 23–26.
- [6] Schröter W., Hedemann H., Kveder V., et al. Measurements of energy spectra of extended defects. *J. Phys.: Condens. Matter.*, 2002, vol. 14, no. 48, pp. 13047–13059. DOI: 10.1088/0953-8984/14/48/350
- [7] Лозовой К.А. Кинетика формирования наногетероструктур с квантовыми точками германия на кремнии для приборов оптоэлектроники. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, ТГУ, 2016.
- [8] Istratov A.A., Weber E.R. Electrical properties and recombination activity of copper, nickel and cobalt in silicon. *Appl. Phys. A*, 1998, vol. 66, iss. 2, pp. 123–136. DOI: 10.1007/s003390050649
- [9] Махкамов Ш., Каримов М., Курбанов А.О. и др. К вопросу термостабильности электрофизических свойств  $p$ -Si<P, Ni> и  $p$ -Si<P, Cu>. *Известия вузов. Физика*, 2005, № 12, с. 80–82.
- [10] Tanaka S., Ikari T., Kitagawa H. In-diffusion and annealing processes of substitutional nickel atoms in dislocation-free silicon. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2001, vol. 40, part 1, no. 5A, pp. 3063–3068. DOI: 10.1143/JJAP.40.3063

**Зайнабидинов Сиражиддин Зайнабидинович** — д-р физ.-мат. наук, академик, профессор кафедры «Физика» Андижанского государственного университета (Республика Узбекистан, 170100, Андижан, Университетская ул., д. 129).

**Курбанов Азизжон Обитжонович** — канд. физ.-мат. наук, докторант кафедры «Физика» Андижанского государственного университета (Республика Узбекистан, 170100, Андижан, Университетская ул., д. 129).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Зайнабидинов С.З., Курбанов А.О. Кластеры атомов примеси никеля и их влияние на рекомбинационные свойства кремния. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2019, № 2, с. 81–93.

DOI: 10.18698/1812-3368-2019-2-81-93

**NICKEL-DOPANT ATOM CLUSTERS AND THEIR EFFECT ON THE RECOMBINATION PROPERTIES OF SILICON**

S.Z. Zaynabidinov

prof\_sirojiddin@mail.ru

A.O. Kurbanov

qurbonov26@yahoo.com

**Andijan State University, Andijan, Republic of Uzbekistan**

---

**Abstract**

The investigation determined the types and nature of structural defects in *n*-type silicon featuring nickel-dopant atom clusters by using deep-level transient spectroscopy (DLTS) and measuring specific resistance, concentration and lifetime of charge carriers. The investigation employed the *Solver-NEXT* infrared and atomic-force microscopes. We observed that after high-temperature diffusion star-like defects appear in those Si<Ni> samples that were cooled slowly. Rapid cooling of Si<Ni> samples yields no decorating of dislocations, which is linked to formation of [Ni–O]-type point defects, [Ni–Si] silicides and Ni[Ni<sub>i</sub>–Ni<sub>j</sub>] atom pairs (unlike in the case of slowly cooled doped Si<Ni> samples). The differences in shape and size of the defects forming in slowly and rapidly cooled Si<Ni> samples may be explained as follows: in the case of slow cooling, as the system transitions into the equilibrium state, its free energy decreases, and nickel atoms gradually precipitating at the defects of the crystal lattice form inclusions characterised by the most energetically favourable state, that is, star-like defects. We detected an increase in charge carrier lifetime caused by formation of a trapping level connected to the [Ni–O] complex in silicon

**Keywords**

*Silicon, nickel, oxygen, cluster, complex, lifetime, recombination properties*

Received 17.04.2018

© Author(s), 2019

## REFERENCES

- [1] Fistul' V.I. Atomy legiruyushchikh primesey v poluprovodnikakh [Atoms of alloying impurities in semiconductors]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004.
- [2] Silva D.J., Wahl U., Correia J.G., et al. Drawing the geometry of 3d transition metal-boron pairs in silicon from electron emission channeling experiments. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B.*, 2016, vol. 371, pp. 59–62. DOI: 10.1016/j.nimb.2015.09.051
- [3] Vyvenko O.F., Buonassisi T., Istratov A.A. X-ray beam induced current — a synchrotron radiation based technique for the *in situ* analysis of recombination properties and chemical nature of metal clusters in silicon. *J. Appl. Phys.*, 2002, vol. 91, iss. 6, pp. 3614–3617. DOI: 10.1063/1.1450026
- [4] Riedel F., Schröter W. Electrical and structural properties of nanoscale NiSi<sub>2</sub> precipitates in silicon. *Phys. Rev. B*, 2000, vol. 62, iss. 11, pp. 7150–7156. DOI: 10.1103/PhysRevB.62.7150
- [5] Abdurakhmanov B.A., Bakhadir Khanov M.K., Ayupov K.S. Formation of clusters of impurity atoms of nickel in silicon and controlling their parameters. *Nanosci. Nanotechnol.*, 2014, vol. 4, no. 2, pp. 23–26.
- [6] Schröter W., Hedemann H., Kveder V., et al. Measurements of energy spectra of extended defects. *J. Phys.: Condens. Matter.*, 2002, vol. 14, no. 48, pp. 13047–13059. DOI: 10.1088/0953-8984/14/48/350
- [7] Lozovoy K.A. Kinetika formirovaniya nanogeterostruktur s kvantovymi tochkami germaniya na kremnii dlya priborov optoelektroniki. Dis. kand. fiz.-mat. nauk [Kinetics of nanoheterostructures formation with quantum dots of germanium on silicon for optoelectronics devices. Cand. Phys.-Math. Sci. Diss.]. Tomsk, TSU Publ., 2016 (in Russ.).
- [8] Istratov A.A., Weber E.R. Electrical properties and recombination activity of copper, nickel and cobalt in silicon. *Appl. Phys. A*, 1998, vol. 66, iss. 2, pp. 123–136. DOI: 10.1007/s003390050649
- [9] Makhkamov Sh., Karimov M., Kurbanov A.O., et al. On the thermostability of electrical properties of *p*-Si <P, Ni> and *p*-Si <P, Cu>. *Russ. Phys. J.*, 2005, vol. 48, iss. 12, pp. 1298–1301. DOI: 10.1007/s11182-006-0061-5
- [10] Tanaka S., Ikari T., Kitagawa H. In-diffusion and annealing processes of substitutional nickel atoms in dislocation-free silicon. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2001, vol. 40, part 1, no. 5A, pp. 3063–3068. DOI: 10.1143/JJAP.40.3063

**Zaynabidinov S.Z.** — Dr. Sc. (Phys.-Math.), Academician, Professor, Department of Physics, Andijan State University (Universitetskaya ul. 129, Andijan, 170100 Republic of Uzbekistan).

**Kurbanov A.O.** — Cand. Sc. (Phys.-Math.), Doctoral Student, Department of Physics, Andijan State University (Universitetskaya ul. 129, Andijan, 170100 Republic of Uzbekistan).

**Please cite this article in English as:**

Zaynabidinov S.Z., Kurbanov A.O. Nickel-dopant atom clusters and their effect on the recombination properties of silicon. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2019, no. 2, pp. 81–93 (in Russ.).

DOI: 10.18698/1812-3368-2019-2-81-93



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана  
вышло в свет учебное пособие автора

**И.Ю. Савельевой, И.В. Станкевича**

**«Математическое моделирование  
процессов теплопроводности методом  
конечных элементов»**

Приведены формулировки стационарных и нестационарных задач теплопроводности. Рассмотрены основные особенности построения численного решения этих задач в рамках конечно-элементной технологии.

Для студентов 3-го и 4-го курсов факультета «Фундаментальные науки» МГТУ им. Н.Э. Баумана, изучающих дисциплины «Уравнения математической физики», «Методы вычислений», «Математическое моделирование», «Прикладные пакеты инженерного анализа», «Математические модели механики сплошной среды» и выполняющих соответствующие курсовые работы. Может быть полезно студентам старших курсов других факультетов, изучающим численные методы решения краевых и начально-краевых задач.

**По вопросам приобретения обращайтесь:**

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1  
+7 (499) 263-60-45  
press@bmstu.ru  
<http://baumanpress.ru>