

# ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАРШРУТЫ TECHNOLOGICAL PROCESSORS AND ROUTES

УДК 621.382.323-022.532

DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-1-19-30

## Латеральная рекристаллизация наноструктур аморфного кремния с использованием силицида никеля

*С.О. Белостоцкая, Е.В. Кузнецов, Е.Н. Рыбачек, О.В. Губанова*

*НПК «Технологический центр», г. Москва, Россия*

*O.Chuyko@tcen.ru*

Метод металлостимулированной латеральной рекристаллизации является актуальной исследовательской задачей для создания ИС многоуровневой архитектуры, чувствительных элементов сенсоров, а также электронных микро- и наносистем. В работе представлен оптимизированный метод металлостимулированной латеральной рекристаллизации (Metal-Induced Lateral Crystallization, MILC) нанопроволочных структур из аморфного кремния с использованием силицида никеля. На основе данного метода изготовлены нанопроволочные *n*-канальные полевые транзисторы с окружным затвором – MILC GAA-транзисторы (Gate-All-Around). Аналогичные структуры созданы на основе монокристаллического кремния с использованием КНИ-подложек – КНИ GAA-транзисторы. Выполнен сравнительный анализ электрических характеристик полевых нанопроволочных GAA-транзисторов на основе рекристаллизованного и монокристаллического кремния. Показано, что электрофизические характеристики нанопроволочных MILC GAA-транзисторов сравнимы с характеристиками нанопроволочных КНИ GAA-транзисторов. Так, измеренная подвижность электронов в слабых полях для MILC GAA-транзистора составила  $130 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ , для КНИ GAA-транзистора –  $200 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ .

**Ключевые слова:** нанопроволочные структуры; силицид никеля; латеральная металлостимулированная рекристаллизация (MILC); *n*-канальный GAA-транзистор с окружным затвором; МОП-технология; КНИ-технология; ИС

**Финансирование работы:** работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (госзадание № 0N59-2019-0019).

**Для цитирования:** Белостоцкая С.О., Кузнецов Е.В., Рыбачек Е.Н., Губанова О.В. Латеральная рекристаллизация наноструктур аморфного кремния с использованием силицида никеля // Изв. вузов. Электроника. 2020. Т. 25. № 1. С. 19–30. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-1-19-30

## Lateral Crystallization of Amorphous Silicon Nanowires Using NickelSilicide

S.O. Belostotskaya, E.V. Kuznetsov, E.N. Rybachek, O.V. Gubanova

SMC «Technological Centre», Moscow, Russia

O.Chuyko@tcen.ru

**Abstract:** The metal-induced recrystallization method is an urgent research task for creating the integrated circuits of multi-level architecture, sensitive elements of sensors as well as of the electronic micro- and nanosystems. In the work an optimized method of the metal-induced lateral recrystallization (MILC) of the nano-wire structures from amorphous silicon (a-Si) using nickel silicide has been presented. Based on the given method the nano-wire n-channel field transistors (Gate-All-Around) – MILC GAA transistors have been manufactured. Similar structures have been manufactured based on monocrystal silicon using SOI (SIMOX) structures have been made. The comparison between the electric characteristics of MILS GAA of field nanowire transistors based on recrystallized monocrystal silicon has been performed. It has been shown that the electric-physical characteristics of nano-wire MLC GAA transistors on recrystallized silicon are comparable with nanowire MILC transistors. Thus, the measured MILC G-AA – mobility of electrons in weak fields for MILC GAA of the transistor was  $130 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  for MILC GAA transistor it was  $200 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ .

**Keywords:** nanowire structures; nickel silicide; lateral metal-induced crystallization (MILC); n-channel GAA transistor; MOS technology; IC

**For citation:** Belostotskaya S.O., Kuznetsov E.V., Rybachek E.N., Gubanova O.V. Lateral crystallization of amorphous silicon nanowires using nickelsilicide. *Proc. Univ. Electronics*, 2020, vol. 25, no. 1, pp. 19–30. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-1-19-30

**Funding:** the study has been supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (state assignment № 0N59-2019-0019).

**Введение.** В настоящее время кремниевые нанопроволочные транзисторы находят все большее применение в различных областях микро - и наносистемной техники [1–3]. Особое место занимают ИС, изготавливаемые с применением метода латеральной металлостимулированной рекристаллизации (Metal Induced Lateral Crystallization, MILC), которые используются в производстве ЖК-дисплеев с активными матрицами, при создании переключающих элементов и управляющих ИС активной матрицы [3–5]. Одним из материалов, применяемых при производстве многоуровневых ИС, является рекристаллизованный аморфный кремний [6, 7]. В работе [1] подвижность основных носителей кремниевых нанопроволочных транзисторов, изготовленных методом MILC, составила  $80 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{с}$ , допороговый наклон равен  $110 \text{ мВ/декада}$  тока.

Цель настоящей работы – оптимизация метода MILC при изготовлении нанопроволочных структур из аморфного кремния (a-Si) с использованием силицида никеля ( $\text{NiSi}_2$ ) для улучшения качества кристаллизованных нанопроволочных элементов. Изготовлены нанопроволочные n-канальные полевые MILC GAA-транзисторы с окружным затвором (Gate-All-Around) с использованием оптимизированного метода MILC. Основные электрические параметры изготовленных MILC GAA-транзисторов сравнива-

лись как с конструктивно подобными КНИ GAA-транзисторами, изготовленными на основе монокристаллического кремния с использованием КНИ-подложек, так и со структурами MILC SiWs, описанными в работе [1].

**Метод MILC с использованием силицида никеля.** Одним из перспективных способов латеральной рекристаллизации тонких слоев аморфного кремния является применение слоев  $\text{NiSi}_2$  в качестве источников центров рекристаллизации [3–7]. Как показано в работе [6], температура формирования  $\text{NiSi}_2$  на  $a\text{-Si}$  значительно ниже (менее  $400^\circ\text{C}$ ) температуры формирования  $\text{NiSi}_2$  на кремниевой подложке (выше  $600^\circ\text{C}$ ), а период кристаллической решетки  $\text{NiSi}_2$  составляет  $5,406 \text{ \AA}$ , что всего на  $0,4\%$  меньше периода кристаллической решетки кремния, равного  $5,430 \text{ \AA}$ . Кристаллиты  $\text{NiSi}_2$ , образованные в объеме  $a\text{-Si}$ , при последующих термических обработках играют роль центров рекристаллизации и преимущественно ориентированы в направлениях  $[110]$  и  $[100]$  к поверхности пленки.

На рис.1 показана структура для локального формирования рекристаллизованного слоя  $a\text{-Si}$  с использованием никеля как источника центров рекристаллизации [4]. Структура представляет собой слой  $a\text{-Si}$  толщиной  $100 \text{ нм}$  на изолирующем диэлектрике. Сверху сформирована маска из оксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ), осажденного при температуре ниже температуры рекристаллизации, в которой вскрыты контактные окна к  $a\text{-Si}$ . Пленка никеля сформирована магнетронным напылением. При термической обработке в инертной среде при температуре от  $525$  до  $625^\circ\text{C}$  в контактных окнах происходит твердофазная реакция никеля с  $a\text{-Si}$  с образованием  $\text{NiSi}_2$ , что приводит к снижению энергии активации процесса рекристаллизации  $a\text{-Si}$ . В процессе термической обработки под слоем  $\text{NiSi}_2$  аморфный кремний рекристаллизуется в МІС-поликремний (Metal Induced Crystallization), который имеет малый размер зерна и огромное количество границ зерен. Далее рекристаллизация протекает латерально в глубь аморфного кремния, образуя слой МІЛС-поликремния. Его структура в основном содержит горизонтальные нитеобразные зерна, которые после заключительных термообработок можно использовать в качестве рабочих областей транзисторов [1–6].

Основной недостаток полученного МІС-поликремния – высокая концентрация атомов никеля, которая приводит к металлическим загрязнениям пленки МІЛС-поликремния. При этом температура рекристаллизации уменьшается с повышением концентрации металла в  $a\text{-Si}$  [6]. Путем изменения температуры и времени термической обработки концентрацию никеля в пленке можно менять в широких пределах. Уменьшение концентрации никеля в  $a\text{-Si}$  является важной задачей для обеспечения высокого качества пленки МІЛС-поликремния. Процесс рекристаллизации дает возможность получить размер кристаллитов, достаточный для формирования на них рабочих областей – каналов полевых транзисторов. Применение данного процесса перспективно при создании наноразмерных структур для формирования на их основе приборов микро- и наносистемной техники, медицины, а также в других приложениях [1].

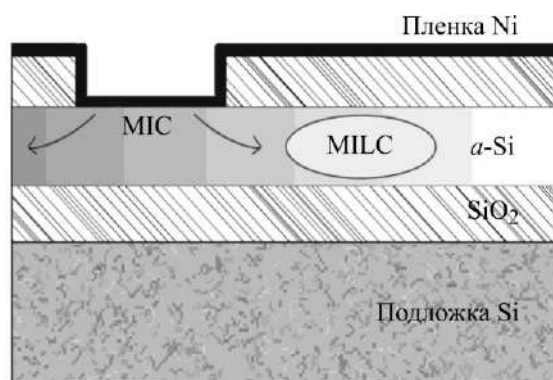


Рис.1. Латеральная кристаллизация аморфного кремния [4]  
Fig.1. Lateral crystallization of amorphous silicon [4]

В настоящей работе с применением метода MILC проведена рекристаллизация аморфных нанопроволочных структур, на основе которых изготовлен и исследован *n*-канальный нанопроволочный MILC GAA-транзистор с окружным затвором [8]. Конструкция MILC GAA-транзистора обеспечивает увеличение тока стока транзистора в открытом состоянии при уменьшении тока стока в закрытом состоянии по сравнению с другими типами полевых транзисторов. Поэтому она рассматривается в качестве основной конструкции активных элементов будущих ИС с предельными проектными нормами.

Движение фронта рекристаллизации направлено преимущественно латерально по всей протяженности нанопроволочного элемента [1]. При этом предполагалось, что пространственное ограничение области рекристаллизации может привести к более совершенной кристаллической структуре нанопроволоки с возможностью формирования проводящего канала на основе одного монокристалла.

**Эксперимент.** При исследовании процесса металлостимулированной рекристаллизации *a*-Si определены основные конструктивные и технологические параметры, гарантирующие получение достаточного для формирования проводящего канала полевых транзисторов размера кристаллитов. В работе подобраны толщина пленок *a*-Si и никеля; температура отжига пленки никеля после магнетронного напыления для формирования NiSi<sub>2</sub>; температура рекристаллизационного отжига в инертной среде. Определена зависимость длины фронта рекристаллизации от времени термического отжига и геометрии тестовых структур.

Слой *a*-Si толщиной 150 нм осаждали при температуре 550 °С и давлении 40 Па. На него осаждали слой плазмохимического оксида кремния при температуре 350 °С, в котором вскрыты области контактов к *a*-Si. Методом магнетронного напыления сформирован слой никеля толщиной 30 нм, и в одном вакуумном цикле проведен термический отжиг для формирования NiSi<sub>2</sub>. Избыточный никель удаляли методом жидкостного химического травления в растворе Каро (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> = 7:3) при температуре порядка 100 °С в течение 2 мин. Рекристаллизация слоя аморфного кремния проходила при температуре 530 °С в атмосфере азота.

Для определения скорости кристаллизации на полученных образцах проведена оценка размера отдельных рекристаллизованных зерен MILC-поликремния. Зерна MILC-поликремния исследованы методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) (рис.2).

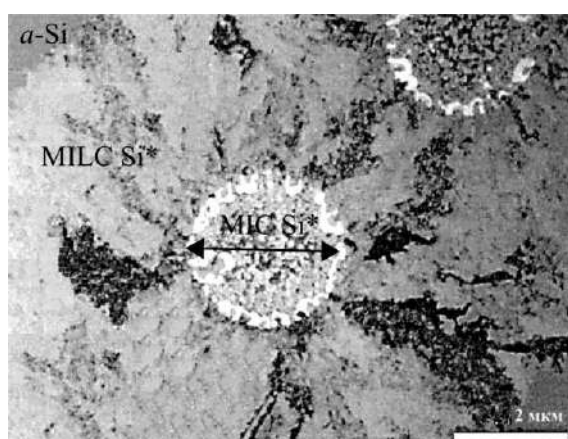


Рис.2. Светлопольное ПЭМ-изображение участков МЛС, MILC и аморфного поликремния  
Fig.2. TEM image: the bright-field image of the MILC, MILC and amorphous polysilicon areas

После 9 ч термического отжига при температуре 530 °С получен размер кристаллитов не менее 5 мкм. Следовательно, скорость роста MILC-кристаллитов в пленке составляет не менее 0,5 мкм/ч. Она зависит от температуры и превышает почти в 2 раза скорость, приведенную в работе [1], при температуре 450 °С. На основании полученных результатов определены технологические режимы рекристаллизации нанопроволочных элементов с использованием MILC-процесса.

Для изготовления нанопроволочных *n*-канальных полевых MILC GAA-транзисторов потребовалось 12 фотолитографических циклов. Основные этапы формирования транзисторной структуры представлены на рис.3.



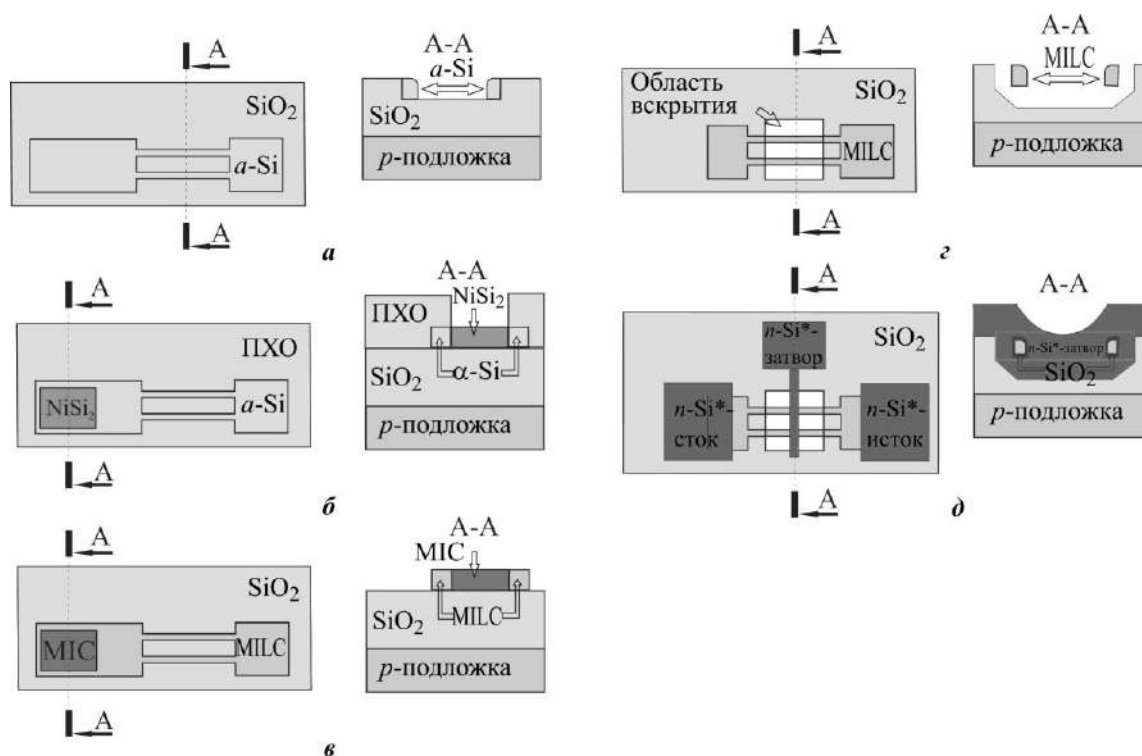


Рис.3. Основные этапы создания MISC GAA-транзистора: а – формирование нанопроволочных элементов на опорном рельефе; б – напыление пленки никеля; в – образование MISC- и MISC-областей после процесса рекристаллизации; г – травление опорного рельефа; д – формирование окружающего затвора транзистора

Fig.3. Image of the main stages of the formation of the MISC GAA transistor: a – nanowire elements on the supporting relief; b – the formation of the seed NiSi<sub>2</sub>; c – MISC and MISC areas after the recrystallization process; d – etching of the supporting relief; e – the formation of a gate all around transistor

Исходные кремниевые подложки ориентации  $\langle 100 \rangle$   $p$ -типа окислены на толщину 600 нм, проведены операции фотолитографии и анизотропного реактивно-ионного травления слоя оксида кремния для создания вертикального опорного рельефа высотой 200 нм. Также проведен процесс конформного химического осаждения при пониженном давлении пленки аморфного кремния толщиной 150 нм при температуре 550 °С. Для формирования активных областей тестовых структур «спейсерным» способом применяли операции фотолитографии и анизотропного реактивно-ионного травления слоя аморфного кремния со всех вертикальных поверхностей, не закрытых фоторезистом. Структура, состоящая из изолированных островков  $a$ -Si, соединенных спейсерами (нанопроволочными элементами), лежащими на опорном рельефе оксида кремния, показана на рис.3,а. Далее на сформированные структуры осаждали маскирующий плазмохимический оксид кремния толщиной 450 нм при температуре 350 °С и проводили фотолитографию и травление окон к аморфному кремнию. Магнетронным напылением наносили пленку никеля толщиной 30 нм с отжигом в одном вакуумном цикле для формирования NiSi<sub>2</sub>. Жидкостным химическим травлением в растворе Каро удаляли непрореагировавший никель с поверхности маскирующего оксида и силицида (рис.3,б). Для гарантированной рекристаллизации областей нанопроволочных спейсерных элементов (областей каналов) и стоков-истоков исследуемых тестовых GAA-транзисторов (рис.3,в) рекристаллизационный отжиг составил 20 ч при температуре 530 °С в среде азота. Затем жидкостным травлением удален MISC-поликремний из области затравки, а плазмохимическим травлением – оставшийся поликремний в области

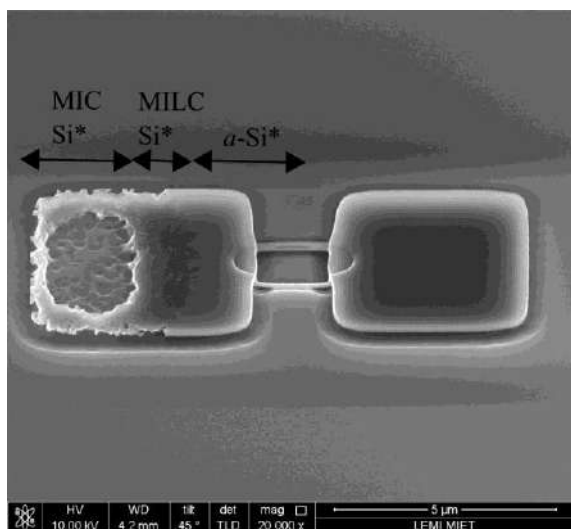
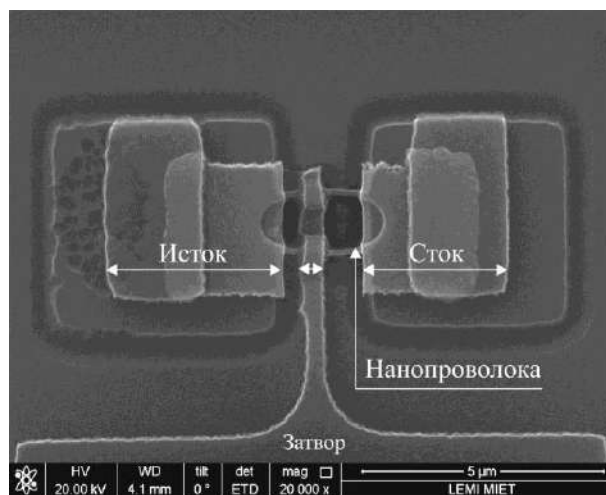


Рис.4. РЭМ-изображение нанопроволочной транзисторной структуры после жидкостного удаления никелевой затравки

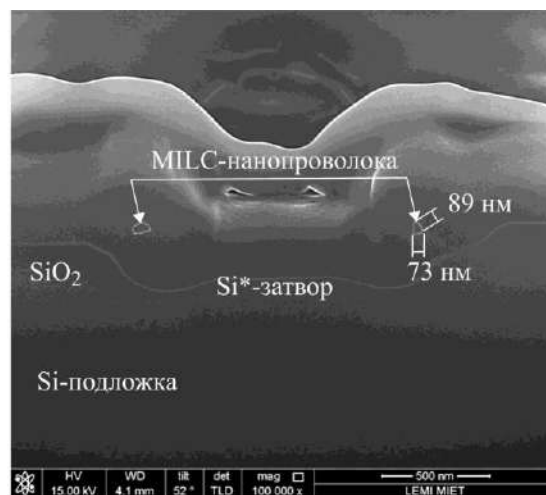
Fig.4. SEM image of the Nanowire transistor structure after wet etching of nickel seed

аморфного кремния). На рис.5 приведено РЭМ-изображение конструкции разработанного MILC GAA-транзистора с поликремниевым затвором на основе рекристаллизованного аморфного кремния.

контактного окна. В буферном травителе потравлен опорный оксид только в областях нанопроволочных элементов и проведено их окисление для очистки поверхности и утонения рабочего MILC-слоя в области канала транзистора (рис.3,з). Подзатворный диэлектрик толщиной 9 нм сформирован термическим окислением в среде  $O_2$  при температуре 900 °С. Итоговый диаметр рекристаллизованных кремниевых нанопроволок составил порядка 90 нм. Далее сформирован окружной поликремниевый затвор толщиной 300 нм и проведена самосовмещенная ионная имплантация фосфора областей затвора и стоков-истоков (рис.3,д). На рис.4 представлено РЭМ-изображение нанопроволочной транзисторной структуры после жидкостного удаления никелевой затравки (показаны стадии рекристаллизации



а



б

Рис.5. РЭМ-изображение *n*-канального MILC GAA-транзистора с поликремниевым затвором: а – вид сверху; б – поперечный раз в области нанопроволочного элемента

Fig.5. SEM image of the *n*-channel MILC GAA transistor with a polysilicon gate: а – top view; б – cross-sectional in the region of the nanowire element

Проведено сравнение электрофизических характеристик изготовленного *n*-канального MILC GAA-транзистора с характеристиками аналогичных по конструкции и геометрии *n*-канальных КНИ GAA-транзисторов. Нанопроволочные элементы в последнем случае сформированы по «спейсерной» технологии с торцевым окислением исходного монокристаллического слоя кремния КНИ-подложки [9]. Полученный нанопроволочный КНИ GAA-транзистор показан на рис.6,а. Диаметр нанопроволок составляет около 20 нм, толщина затворного оксида равна 6,5 нм (рис.6,б).

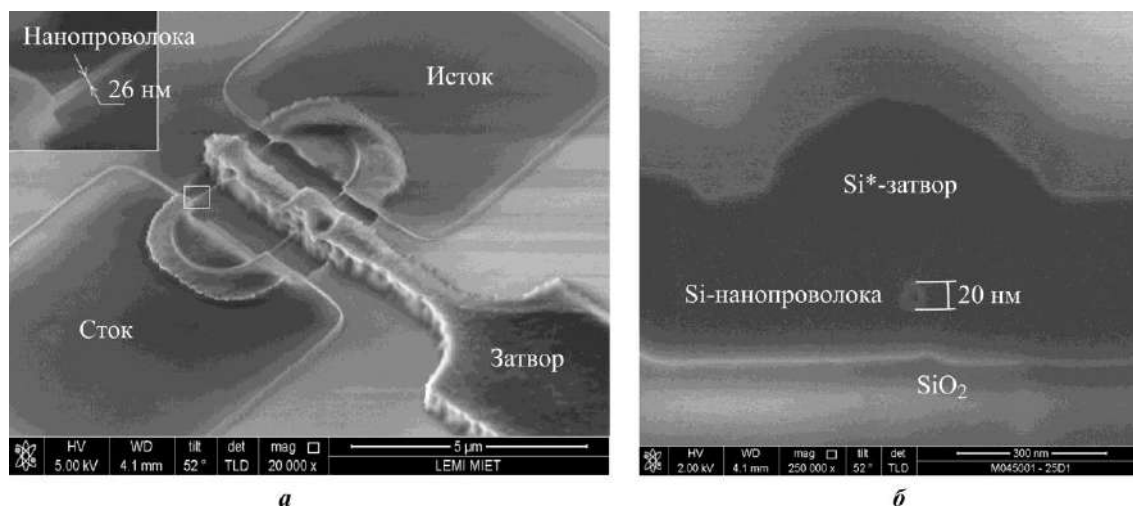


Рис. 6. РЭМ-изображение КНИ GAA-транзистора с поликремниевым затвором: *a* – вид сверху, *б* – поперечный рез в области нанопроволочного элемента  
 Fig.6. SEM image of the SOI GAA transistor with a polysilicon gate: *a* – top view; *b* – cross-sectional in the region of the nanowire element

**Анализ электрофизических параметров GAA-транзисторов.** Измерения электрофизических параметров GAA-транзисторов проводили на оборудовании ЦКП «Функциональный контроль и диагностика микро- и наносистемной техники» на базе НПК «Технологический центр»: анализаторе полупроводниковых приборов Agilent B1500A и зондовой станции Cascade PM5. С помощью системы Agilent B1500A измерены статические ВАХ нанопроволочного *n*-канального MILC GAA-транзистора. Длина каналов двух типов транзисторов  $L = 0,8$  мкм, а ширину  $W$  определяли диаметром нанопроволоки: для технологии МОП КНИ  $W \approx 20$  нм, для технологии МОП MILC  $W \approx 90$  нм. В нормальных условиях проведены измерения проходной ВАХ транзистора (зависимость тока стока  $I_{DS}$  от напряжения на затворе  $V_G$  при фиксированном постоянном напряжении исток – сток  $V_{DS} = 0,1$  В) и определено значение допорогового наклона  $S$ . Поскольку у рассматриваемых транзисторов ширина разная, необходимо выбрать критерий приведения тока стока к удельному значению. В случае нанопроволочного транзистора отношение токов пропорционально диаметру нанопроволочных элементов.

На рис.7 представлены удельные значения тока стока транзисторов. Наклон допороговой характеристики (рис.7,*a*) исследуемого нанопроволочного *n*-канального MILC GAA-транзистора составляет 70 мВ/декаду тока, а для КНИ GAA-транзистора – порядка 60 мВ/декаду тока. Из графика 7,*б* видно, что плотность тока стока КНИ GAA-транзистора в 2 раза выше плотности тока MILC GAA-транзистора.

Выражение тока стока транзистора  $I_{DS}$  описывается следующей формулой [10]:

$$I_{DS} = \frac{W}{L} C_{oxGAA} \mu (V_G - V_T) V_{DS},$$

где  $C_{oxGAA}$  – емкость подзатворного диэлектрика;  $\mu$  – подвижность основных носителей заряда;  $V_T$  – пороговое напряжение транзистора.

Емкость подзатворного диэлектрика для GAA-транзистора определяется на основе полученных технологических величин [11]:

$$C_{oxGAA} \approx \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon L}{\ln(2t/d)},$$

где  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость подзатворного диэлектрика;  $\epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума;  $t$  – толщина подзатворного окисла;  $d$  – диаметр нанопроволочной структуры.

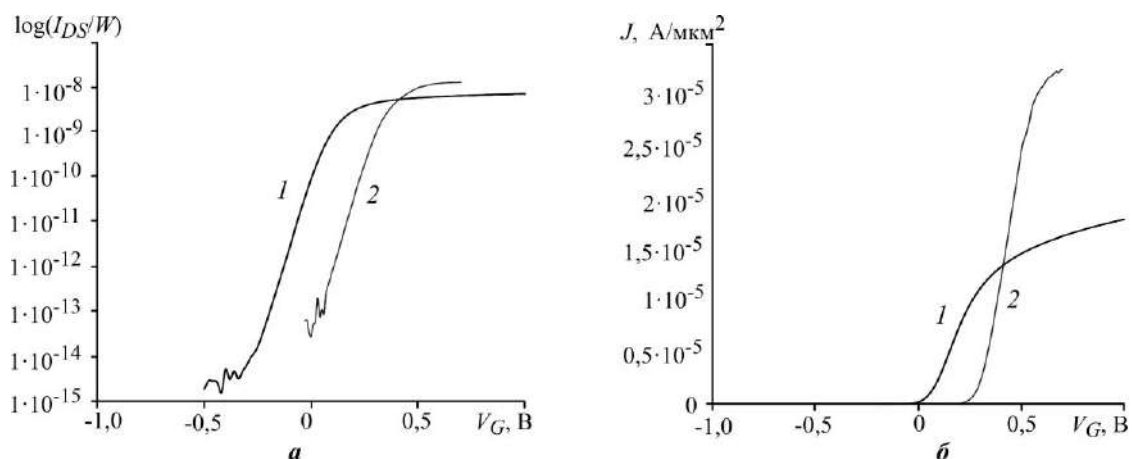


Рис.7. ВАХ  $n$ -канального GAA-транзистора при  $V_{DS} = 0,1$  В (а) и зависимость плотности тока от напряжения на затворе  $n$ -канального GAA-транзистора (б): 1 – MILC GAA-транзистор ( $W/L \approx 0,09/0,8$ ); 2 – КНИ GAA-транзистор ( $W/L \approx 0,02/0,8$ )

Fig.7. I-V curves of the  $n$ -channel GAA-transistor on  $V_{DS} = 0,1$  V (a) and dependence of the current density of the  $n$ -channel GAA-transistor on the gate voltage (b): 1 – MILC GAA transistor ( $W/L \approx 0.09/0.8$ ); 2 – SOI GAA transistor ( $W/L \approx 0.02/0.8$ )

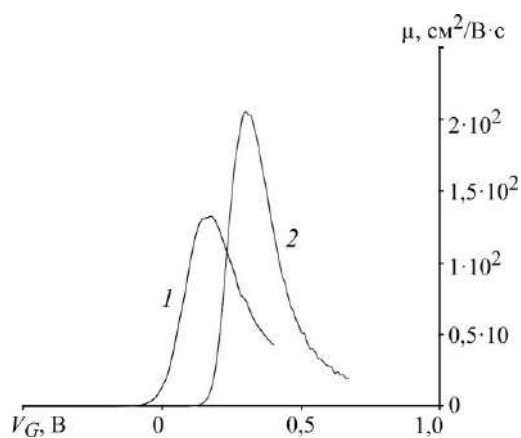


Рис.8. Зависимость подвижности электронов от напряжения на затворе  $n$ -канального GAA-транзистора: 1 – MILC GAA-транзистор ( $W/L \approx 0,09/0,8$ ); 2 – КНИ GAA-транзистор ( $W/L \approx 0,02/0,8$ )

Fig.8. Dependence of the electron mobility of the  $n$ -channel GAA transistor: 1 – MILC GAA transistor ( $W/L \approx 0.09/0.8$ ); 2 – SOI GAA transistor ( $W/L \approx 0.02/0.8$ )

Подвижность основных носителей заряда вычислена по формуле [12]

$$\mu = \frac{g_m L^2}{C_{oxGAA} V_{DS}}, \quad g_m = \frac{dI_{DS}}{dV_G}.$$

Численное значение подвижности основных носителей заряда получено как максимум функции  $f = \mu(V_G)$ .

На рис.8 представлены графики зависимости подвижности основных носителей заряда от напряжения на затворе для транзисторов, изготовленных по двум технологиям. Расчет подвижности выполнен при следующих значениях толщины подзатворного окисла:  $t \approx 9$  нм для MILC GAA-транзистора и  $t \approx 6$  нм для КНИ GAA-транзистора. Значение подвижности электронов в канале для MILC GAA-транзистора составляет порядка  $130 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ , для КНИ GAA-транзистора – порядка  $200 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ .

Основные электрофизические параметры  $n$ -канального транзистора GAA-типа, изготовленного по двум технологиям, представлены в таблице.



**Основные электрофизические параметры MILC GAA- и КНИ GAA-транзисторов**  
**The electrophysical parameters of MILC GAA and SOI GAA transistors**

Параметр	MILC GAA-транзистор	КНИ GAA-транзистор
Пороговое напряжение $V_t$ , В	0,1	0,4
Допороговый наклон $S$ , мВ/декаду тока	70	60
Подвижность основных носителей заряда $\mu$ , см <sup>2</sup> /В·с	130	200

**Обсуждение результатов.** Предложенный процесс металлостимулированной рекристаллизации нанопроволочных структур из  $a$ -Si с использованием  $\text{NiSi}_2$  позволяет формировать на их основе каналы полевых транзисторов. Электрофизические параметры нанопроволочных MILC GAA- и КНИ GAA-транзисторов, приведенные в таблице, характеризуют структуру области проводящего канала полевого транзистора.

Разница в значениях порогового напряжения двух типов транзисторов в первую очередь связана с различиями концентрации акцепторов в области канала. Для MILC GAA-транзистора область канала – это нелегированные латерально ориентированные монокристаллы MILC-поликремния, для КНИ GAA-транзистора – монокристаллический кремний рабочего слоя КНИ-подложки, легированный бором с концентрацией  $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . В результате пороговое напряжение КНИ GAA-транзистора увеличивается.

Разница в значениях допорогового наклона и подвижности основных носителей заряда в канале двух типов транзисторов в большей степени может быть связана с разницей в плотности поверхностных состояний на границе раздела полупроводник – затворный оксид. Дополнительные поверхностные состояния на границе раздела рекристаллизованный аморфный кремний – затворный оксид, возникающие, вероятно, в том числе и из-за избыточных атомов никеля, попавших в канал в процессе рекристаллизации, увеличивают значение допорогового наклона MILC GAA-транзистора по сравнению с КНИ GAA-транзистором и снижают подвижность основных носителей заряда. Помимо этого, снижение подвижности в канале MILC GAA-транзистора может быть связано с количеством границ зерен латеральных монокристаллов, их ориентацией и структурным несовершенством.

Отметим, что полученные в работе значения подвижности и допорогового наклона нанопроволочных MILC GAA-транзисторов превышают параметры нанопроволочных КНИ MILC-транзисторов, изготовленных аналогичным «спейсерным» методом [1], более чем в 1,5 раза. Предположительно, такие результаты достигнуты за счет как геометрических особенностей затвора транзистора, так и месторасположения никелевой «затравки». Конструкция затвора MILC GAA-транзистора по сравнению с конструкцией транзистора MILC SiWs [1] обеспечивает преимущество по величине допорогового наклона и по подвижности основных носителей в канале многозатворного транзистора. Расположение никелевой затравки в области MILC-стока, возможно, уменьшает количество избыточных атомов никеля в нанопроволочном элементе, что приводит к улучшению структурного совершенства области канала MILC GAA-транзистора. При использовании метода MILC области никелевой затравки являются жертвенными и полностью удаляются из рабочих областей транзистора после окончания процесса рекристаллизации, в отличие от метода, приведенного в работе [1].

В свою очередь, для уменьшения значения допорогового наклона и увеличения подвижности основных носителей в канале MILC GAA-транзисторов необходима дальнейшая оптимизация процесса рекристаллизации. Для этого требуется провести

дополнительные исследования влияния геометрических размеров исходного слоя аморфного кремния, толщины и расположения островков «затравочного» никеля на свойства рекристаллизованной наноразмерной структуры и элементного состава нанопроволоки в области канала транзистора с помощью методов вторичной ионной масс-спектрометрии. Необходимо дополнительно исследовать зависимость электрофизических параметров MILC GAA-транзисторов от температурного бюджета формирования рекристаллизованных нанопроволочных элементов. Также провести исследование плотности поверхностных состояний на границе раздела рекристаллизованный аморфный кремний – затворный оксид в зависимости от режимных параметров формирования наноразмерных структур.

Для использования MILC GAA-транзисторов при изготовлении широкого спектра ИС необходимо снижение температурного бюджета метода MILC и сокращения количества циклов процесса формирования затворного оксида. Например, для улучшения электрофизических параметров нанопроволочных транзисторов следует использовать низкотемпературные high-k-диэлектрики и применять процесс кристаллизации с температурой не более 450 °С.

**Заключение.** Предложенный метод металлостимулированной латеральной рекристаллизации нанопроволочных структур из аморфного кремния с использованием силицида никеля позволяет формировать нанопроволочные MILC GAA-транзисторы с характеристиками, сравнимыми с монокремниевыми КНИ GAA-транзисторами.

Основными преимуществами предложенного MILC-метода являются экономичность и возможность применения его в различных областях нанoeлектроники. Метод формирования MILC GAA-транзисторов легко интегрируется в технологию изготовления МОП ИС и при снижении температурного бюджета может быть использован для формирования ИС многоуровневой архитектуры. MILC-метод можно использовать как для создания чувствительных элементов сенсоров на поверхности уже изготовленных ИС («гетерогенная» технологии), так и при формировании различных элементов памяти и элементов МЭМС.

### Литература

1. *Borgne B.Le, Pichon L., Thomas M., Salaün A.C.* Reduced bulk and surface states densities in metal induced crystallized polycrystalline silicon nanowires // *Physica Status Solidi (a)*. 2016. Vol. 213. No. 11. P. 2890–2894.
2. *Li G., Zohar Y., Wong M.* Piezoresistive microphone with integrated amplifier realized using metal-induced laterally crystallized polycrystalline silicon // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2004. Vol. 14. No. 10. P. 1352–1358.
3. *Chan V.W.C., Chan P.C.H., Chan M.* Multiple layers of CMOS integrated circuits using recrystallized silicon film // *IEEE Electron Device Letters*. 2001. Vol. 22. No. 2. P. 77–79.
4. *Cheng C.F., Poon M.C., Kok C.W., Chan M.* Modeling of metal-induced-lateral-crystallization mechanism for optimization of high performance thin-film-transistor fabrication // *Digest. International Electron Devices Meeting. IEEE*. 2002. P. 569–572.
5. Polycrystalline silicon produced by Ni–silicide mediated crystallization of amorphous silicon in an electric field / *J. Jang, S.J. Park, K.H. Kim, et al.* // *Journal of Applied Physics*. 2000. Vol. 88. No. 5. P. 3099–3101.
6. *Jang J.* Super-grain poly-Si by metal induced crystallization of amorphous silicon // *Solid State Phenomena. Trans Tech Publications*. 2003. Vol. 93. P. 199–206.
7. Nickel induced crystallization of amorphous silicon thin films / *Z. Jin, A.Bhat Gururaj, M. Yeung et al.* // *Journal of Applied Physics*. 1998. Vol. 84. No. 1. P. 194–200.
8. FinFETs and other multi-gate transistors / *Ed. by J.P. Colinge*. N.Y.: Springer, 2008. Vol. 73. 350 p.
9. *Кузнецов Е.В., Рыбачек Е.Н.* Способ изготовления наноразмерных проволочных кремниевых структур // Патент России № 2435730. 2010.
10. *Bauza D., Ghibauda G.* MOSFET parameter extraction from static, dynamic and transient current measurements // *Microelectronics Journal*. 1994. Vol. 25. No. 1. P. 41–61.

11. Huang Y., Duan X., Cui Y., Lieber C.M. Gallium nitride nanowire nanodevices // *Nano Letters*. 2002. Vol. 2. No. 2. С. 101–104.
12. Keem K., Jeong D.Y., Kim S. Fabrication and device characterization of omega-shaped-gate ZnO nanowire field-effect transistors // *Nano Letters*. 2006. Vol. 6. No. 7. P. 1454–1458.

Поступила в редакцию 08.08.2019 г.; после доработки 15.11.2019 г.; принята к публикации 19.11.2019 г.

**Белостоцкая Светлана Олеговна** – старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории перспективной элементной базы и технологических маршрутов микроэлектроники НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), S.Belostotskaya@tcen.ru

**Кузнецов Евгений Васильевич** – начальник научно-исследовательской лаборатории перспективной элементной базы и технологических маршрутов микроэлектроники НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), KEV@tcen.ru

**Рыбачек Елена Николаевна** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории перспективной элементной базы и технологических маршрутов микроэлектроники НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), REN@tcen.ru

**Губанова Оксана Вадимовна** – научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории перспективной элементной базы и технологических маршрутов микроэлектроники НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), O.Chuyko@tcen.ru

### *References*

1. Borgne B.Le, Pichon L., Thomas M., Salaün A.C. Reduced bulk and surface states densities in metal induced crystallized polycrystalline silicon nanowires. *Physica Status Solidi (a)*, 2016, vol. 213, no. 11, pp. 2890–2894.
2. Li G., Zohar Y., Wong M. Piezoresistive microphone with integrated amplifier realized using metal-induced laterally crystallized polycrystalline silicon. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2004, vol. 14, no. 10, pp. 1352–1358.
3. Chan V.W.C., Chan P.C.H., Chan M. Multiple layers of CMOS integrated circuits using recrystallized silicon film. *IEEE Electron Device Letters*, 2001, vol. 22, no. 2, pp. 77–79.
4. Cheng C.F., Poon M.C., Kok C.W., Chan M. Modeling of metal-induced-lateral-crystallization mechanism for optimization of high performance thin-film-transistor fabrication. *Digest. International Electron Devices Meeting. IEEE*, 2002, pp. 569–572.
5. Jang J., Park S.J., Kim K.H. et al. Polycrystalline silicon produced by Ni–silicide mediated crystallization of amorphous silicon in an electric field. *Journal of Applied Physics*, 2000, vol. 88, no. 5, pp. 3099–3101.
6. Jang J. Super-grain poly-Si by metal induced crystallization of amorphous silicon. *Solid State Phenomena*, 2003, vol. 93, pp. 199–206.
7. Jin Z., Gururaj A. Bhat, Yeung M. et al. Nickel induced crystallization of amorphous silicon thin films. *Journal of Applied Physics*, 1998, vol. 84, no. 1, pp. 194–200.
8. *FinFETs and other multi-gate transistors*. Ed. by Colinge J.P. N.Y., Springer, 2008, vol. 73. 350 p.
9. Kuznetsov E.V., Rybachek E.N. *A method of production nanoscale silicon wire structures*. Patent of Russia, no. 2435730. 2010. (in Russian).
10. Bauza D., Ghibaudo G. MOSFET parameter extraction from static, dynamic and transient current measurements. *Microelectronics journal*, 1994, vol. 25, no. 1, pp. 41–61.
11. Huang Y., Duan X., Cui Y., Lieber C.M. Gallium nitride nanowire nanodevices. *Nano Letters*, 2002, vol. 2, no. 2, pp. 101–104.
12. Keem K., Jeong D.Y., Kim S. Fabrication and device characterization of omega-shaped-gate ZnO nanowire field-effect transistors. *Nano Letters*, 2006, vol. 6, no. 7, pp. 1454–1458.

Received 08.08.2019; Revised 15.11.2019; Accepted 19.11.2019.

**Information about the authors:**

**Svetlana O. Belostotskaya** – Senior Scientific Researcher of the TC’s laboratory, SMS «Technological Center» (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), S.Belostotskaya@tcen.ru

**Evgeniy V. Kuznetsov** – Head of the IC’s laboratory, SMC «Technological Center» (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), KEV@tcen.ru

**Elena N. Rybachek** – Cand. Sci. (Eng.), Senior Scientific Researcher of the TC’s laboratory, SMS «Technological Center» (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), REN@tcen.ru

**Oksana V. Gubanova** – Scientific Researcher of the TC’s laboratory, SMC «Technological Center» (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), O.Chuyko@tcen.ru

## Уважаемые авторы и читатели!



Вышли в свет журналы

### **SEMICONDUCTORS**

Vol. 53, No. 15, 2019. - ISSN PRINT: 1063-7826,  
ISSN ONLINE: 1090-6479,

### **RUSSIAN MICROELECTRONICS**

Vol. 48, No. 7, 2019. - ISSN PRINT: 1063-7397,  
ISSN ONLINE: 1608-3415,

в которых опубликованы избранные статьи  
журнала «Известия вузов. Электроника».

<http://pleiades.online>

<http://link.springer.com>

