



УДК 53.087.04: 621.3.082.72/382.33:546.28-121+54-31

DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.586.590

ИЗУЧЕНИЕ ПОДВИЖНОСТИ ЭЛЕКТРОНОВ И ВАХ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СТРУКТУРНЫХ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УЛЬТРАТОНКОГО КРЕМНИЯ НА САПФИРЕ

STUDYING ELECTRON MOBILITY AND VOLT-AMPERE CHARACTERISTICS OF FIELD-EFFECT TRANSISTORS DEPENDING ON STRUCTURAL AND ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF ULTRATHIN SILICON ON SAPPHIRE

ЕГОРОВ Н. Н.¹

negorov@niimv.ru

EGOROV N. N.¹

negorov@niimv.ru

ГОЛУБКОВ С. А.¹GOLUBKOV S. A.¹ФЕДОТОВ С. Д.^{2,3}

fedotov@epiel.ru

FEDOTOV S. D.^{2,3}

fedotov@epiel.ru

СТАЦЕНКО В. Н.²STATSENKO V. N.²РОМАНОВ А. А.⁴

romanov@angstrom.ru

ROMANOV A. A.⁴

romanov@angstrom.ru

МЕТЛОВ В. А.⁴METLOV V. A.⁴¹АО НИИ МВ

г. Москва, г. Зеленоград

¹ RIMST JSC

Moscow, Russia

²АО «Эпиэл»

г. Москва, г. Москва, г. Зеленоград

² Epiel JSC

Moscow, Russia

³Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1

³ National Research University of Electronic Technology⁴АО «Ангстрем»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 2, стр. 3

⁴ “Angstrem” JSC

bld. 3, 2 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124460

Представлено сравнение характеристик гетероэпитаксиальных структур КНС (производства РФ и импортных) д. 150 мм до и после процедуры твердофазной рекристаллизации слоя Si. Получены ультратонкие (≤ 100 нм) рекристаллизованные слои Si (400) на сапфире со значением FWHM $\sim 0,27^\circ$ (РФ) и FWHM $\sim 0,30^\circ$ (импорт). Результаты электронографии и ПЭМ показали отсутствие рефлексов от двойников и снижение объемной плотности дефектов более чем на два порядка для ультратонкого КНС после процедур имплантации Si⁺ и твердофазной рекристаллизации. Контроль подвижности электронов п-канальных тестовых транзисторов на ультратонком КНС показал, что применение метода твердофазной рекристаллизации позволяет увеличить подвижность в канале на >50 % относительно стандартных структур. Обнаружено, что при возрастании концентрации носителей до $\sim 3,13 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ подвижность электронов падает до $\sim 150\text{--}160 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, а пороговое напряжение п-канального транзистора меняется в диапазоне 0,25–0,75 В, причем ток открытого состояния слабо зависит от уровня легирования.

Ключевые слова: газофазная эпитаксия; ГФЭ; твердофазная рекристаллизация; кремний на сапфире; КНС; ультратонкий КНС; транзистор; МОП; подвижность; вольт-амперные характеристики; ВАХ; МЭМС.

The paper presents a comparison of crystalline quality between domestic fabricated and imported SOS wafers. The wafers were produced by CVD and improved by solid phase epitaxial regrowth (SPER) process with thinning. The XRD measurement of ultrathin (≤ 100 nm) SOS 6 inch wafers revealed Si(400) diffraction peaks with FWHM of $\sim 0.27^\circ$ for domestic and FWHM $\sim 0.30^\circ$ for imported wafers. RHEED and TEM measurements have shown the absence of micro-twins reflexes and reduction in the defect density by more than 2 orders of magnitude for ultrathin SOS after SPER with Si⁺ implantation. Besides, it was



revealed that the utilization of SPER leads to an increase in electron mobility >50% as compared to standard CVD SOS wafer. However, the increase in carrier concentration in Si-layer up to $\sim 3.13 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ leads to a fall in electron mobility down to $\sim 150 - 160 \text{ cm}^2/\text{W}\cdot\text{s}$. Threshold voltage of MOSFETs (n-channel) has shown slight dependence on the level of carrier concentration and varied in the range of 0.25–0.75 W.

Keywords: chemical vapor deposition; CVD; solid phase epitaxial regrowth; SPER; silicon on sapphire; SOS; ultrathin SOS; transistor; MOSFET; electron mobility; volt-ampere characteristics; IV; MEMS.

Гетероэпитаксиальные структуры кремний на сапфире (КНС) занимают обособленное место среди технологий кремний на изоляторе вследствие их применения в производстве радиационно-стойкой космической аппаратуры, в атомной промышленности и ускорителях элементарных частиц, при создании микроволновой и СВЧ электроники, а также микросистемной техники [1–3]. Неоспоримые преимущества КНС связаны с уникальными изолирующими свойствами сапфира. Интегральные схемы (ИС) на КНС обладают малым энергопотреблением и высоким быстродействием за счет низкого рассения мощности и отсутствия паразитных емкостей между изолированными элементами. Сегодня для создания СВЧ ИС используют структуры КНС, полученные методом газофазной эпитаксии (ГФЭ), с толщиной слоя Si ~ 300 нм. Тем не менее использование КНС в области создания СВЧ ИС, предназначенных для сотовой связи и мобильных устройств гражданской электроники, требует формирования ультратонкого (≤ 100 нм) слоя КНС [2]. Высокая плотность структурных дефектов является основным барьером на пути широкого использования ультратонких КНС. Метод твердофазной эпитаксиальной рекристаллизации является практически единственным способом преодоления данного технологического барьера [4, 5].

Монокристаллические слои Si толщиной 300 ± 10 нм были выращены на подложках сапфира R-реза д. 150 мм комбинированным методом ГФЭ (КНС №1) [6]. В целях эксперимента также были приобретены аналогичные структуры КНС импортного производства (КНС №2). Использован процесс твердофазной эпитаксиальной рекристаллизации (ТЭР) с внедрением ионов Si⁺ и утонением в кислороде, подробно описанный в работах [7, 8].

Процесс формирования ультратонкого слоя КНС проводили на установке ионной имплантации в АО «НИИМВ». Доза имплантации составляла $10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-2}$ при энергии 160–200 КэВ. Остаточное давление в камере не превышало $2 \cdot 10^{-4}$ Па. Сканирование слоя КНС осуществлялось ионным пучком в двух взаимно перпендикулярных направлениях, что обеспечивало достаточную равномерность имплантации. Ток вторичных электронов подавлялся специальной системой диaphragm, что позволяло определять дозу имплантации с точностью 5%. Структуры КНС, подвергаемые имплантации ионов, охлаждались до температуры не ниже -10°C . После имплантации ионов Si⁺ и аморфизации базового слоя КНС на заданной толщине производился двухстадийный отжиг при температуре 550–1000 °C в азотной атмосфере. Базовый слой КНС толщиной 300 ± 10 нм подвергался термическому окислению в кислородной атмосфере, после чего сформировавшийся окисел химически удалялся в водном растворе плавиковой кислоты. Таким образом были получены ультратонкие слои КНС толщиной 100 ± 5 нм.

На рис. 1 приведены кривые качания гетероструктур КНС №1 (рис. 1а) и КНС №2 (рис. 1б), измеренные в геометрии θ -2θ для симметричного дифракционного отражения Si(400). Как можно отметить, положение дифракционных пиков для КНС №1 составляет $\theta_i = 34,29 - 34,33^\circ$ и находится левее стандартного положения пика ненапряженного Si(400), равного $\theta_0 = 34,56^\circ$, что говорит о наличии напряжений сжатия, сумма главных латеральных напряжений ($\sigma_1 + \sigma_2$) находится в диапазоне от $-4,24$ до $-5,08$ ГПа. Для КНС №2 наблюдается положение пиков $\theta_i = 35,31 - 35,34^\circ$, что говорит о наличии деформации растяжения ($\sigma_1 + \sigma_2$) в диапазоне от $13,57$ до $14,18$ ГПа. Слои КНС обладали монокристаллической структурой, величина

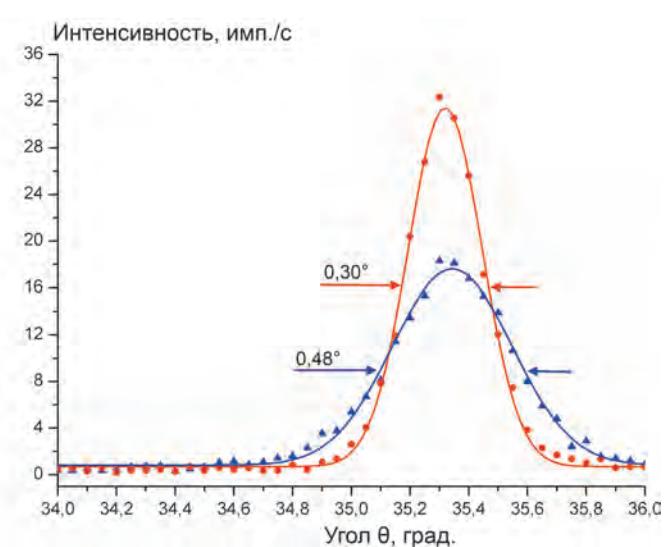
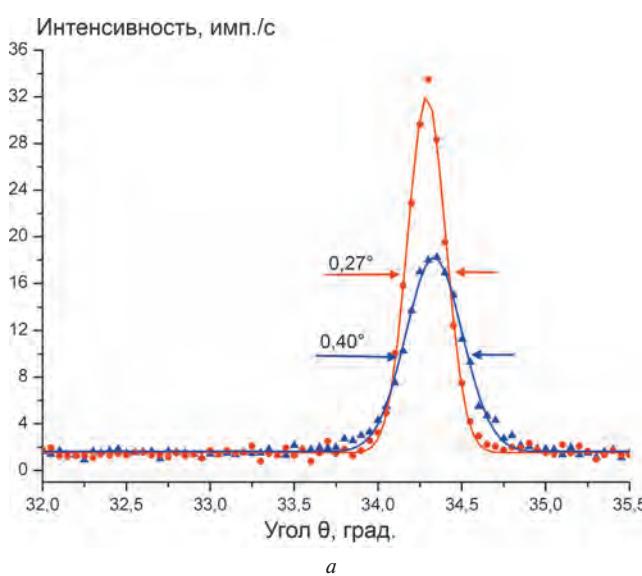


Рис. 1. Кривые качания (θ -2θ-геометрия), гетероструктур КНС различного производства: а) РФ, б) импорт. Синим цветом обозначены кривые качания до ТЭР, красным цветом — после ТЭР



полной ширины по полувысоте кривой качания (FWHM) для гетероструктур КНС №1 составила $0,40^\circ$ до рекристаллизации (300 нм Si) и $0,27^\circ$ после ТЭР (100 нм Si), для импортных КНС №2 FWHM составила $0,48^\circ$ до (300 нм Si) и $0,30^\circ$ после ТЭР (100 нм Si).

Исследование поперечных срезов ультратонких КНС с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) показало наличие двойниковых ламелей (двойников) с границами двойникования параллельно плоскостям $(-11\bar{1})$ и $(-\bar{1}11)$ в объеме слоя ультратонкого КНС, который не был подвергнут ТЭР (рис. 2a). Светлопольные изображения среза структур КНС №1 и №2 продемонстрировали отсутствие двойников в структуре слоя 100 нм Si после процедуры ТЭР, однако на срезах местами присутствовали локальные области, содержащие дислокации или остатки двойниковых ламелей (рис. 2б). Линейная

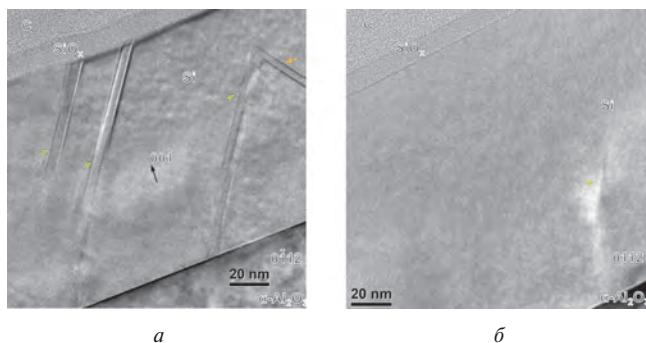


Рис. 2. Светлопольные ПЭМ-изображения срезов ультратонких КНС: а) КНС без проведения ТЭР, б) КНС после ТЭР

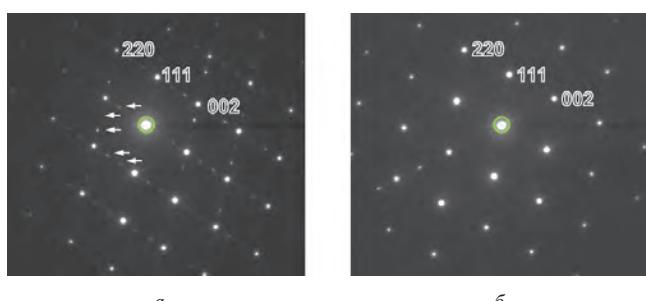


Рис. 3. Электронограммы Si(100), полученные от среза структур ультратонких КНС: а) КНС без проведения ТЭР, б) КНС после ТЭР. Стрелками показаны рефлексы от двойников

Таблица 1. Значения подвижности электронов в лучшей точке при различных длинах затвора ($W = 204$ мкм)

Длина затвора, мкм	Экстраполированный порог, В		Подвижность электронов, см ² /В·с	
	КНС №1	КНС №2	КНС №1	КНС №2
1	1,338	1,224	152,50	154,06
2	1,472	1,352	146,72	141,42
3	1,441	1,372	147,93	133,46
4	1,484	1,371	153,92	130,72

плотность двойников для образцов КНС до ТЭР составила $\sim 3 \cdot 10^5$ см⁻³, что соответствует объемной плотности дефектов $\sim 1 \cdot 10^{16}$ см⁻³.

Образцы ультратонкого КНС после ТЭР продемонстрировали наличие части двойников и дислокаций на темнопольном изображении ПЭМ. Плотность двойников, определенных методом секущей, составила $1 \cdot 10^4$ см⁻³, что подразумевает объемную плотность дефектов $\sim 7 \cdot 10^{14}$ см⁻³. На рис. 2 показаны электрононограммы Si(100), демонстрирующие наличие рефлексов от двойников для срезов ультратонкого КНС до ТЭР (рис. 3a) и отсутствие данных рефлексов для ультратонкого КНС после ТЭР (рис. 3б).

Технологический процесс подготовки тестовых транзисторов на ультратонких структурах КНС (РФ и импорт) включал стандартные операции КМОП-технологии: ионное легирование BF₂ с заданной дозой от $1,88 \cdot 10^{11}$ до $3,13 \cdot 10^{12}$ см⁻², окисление на глубину 50–200 Å, осаждение поли-Si толщиной 0,2–0,4 мкм, диффузию фосфора, фотолитографию по поли-Si с формированием затворов, закисление торцов поли-Si, ионное легирование P 400 мкКл/60 КэВ, разгонку имплантированной примеси, травление окисла, напыление AlN и TiN, фотолитографию по металлам, реактивное ионное травление TiN, химическое травление Al. Полученные тестовые структуры содержали в каждом кадре 16 кольцевых транзисторов с параметрами W/L = 204/4, 204/3, 204/2 и 204/1 мкм (по четыре транзистора каждой длины). Размер контактной площадки затвора и истока составил 50×50 мкм. Подвижность определялась по следующим стандартным формулам. В крутой области ВАХ транзистора определяется формулой

$$I_{di} = \mu_s C_{ox} \frac{W}{L} [V_{gi} - V_{t0}] V_{ds}, \quad (1)$$

отсюда находим подвижность электронов в канале:

$$\mu_s = \frac{I_{di}}{C_{ox} \frac{W}{L} [V_{gi} - V_{t0}] V_{ds}}, \quad (2)$$

где C_{ox} – удельная емкость подзатворного окисла, W, L – ширина и длина канала соответственно.

В табл. 1 приведен расчет подвижности электронов в канале тестовых транзисторов в зависимости от длины затвора для КНС №1 и КНС №2. Экстраполированный порог транзисторов определен в крутой области ВАХ по максимальному наклону касательной к зависимости $I_{ci} = f(U_{sh})$ при $U_c = 0,1$ В. Как видно из приведенных данных, значение экстраполированного порога имело тенденцию к повышению при увеличении длины затвора, в то время как подвижность электронов практически не зависела от длины затвора.

Также в целях определения влияния ТЭР на величину подвижности электронов тестовых МОП-транзисторов одна из базовых структур КНС №2 была подвергнута процедуре ТЭР не полностью, с сохранением области исходного слоя (рис. 3а, участок I). Определено, что проведение ТЭР позволяет увеличить подвижность в канале транзистора на >50% (рис. 3б). Значение разброса подвижности по площади по пяти точкам для КНС №1 составило 100–253 см²/В·с, для КНС №2 – 117–165 см²/В·с.

Контроль электрофизических характеристик показал, что транзисторы на структурах КНС №2 характеризуются высокой неоднородностью токов открытого состояния, в то время как на КНС №1 эта характеристика имела высокую однородность.

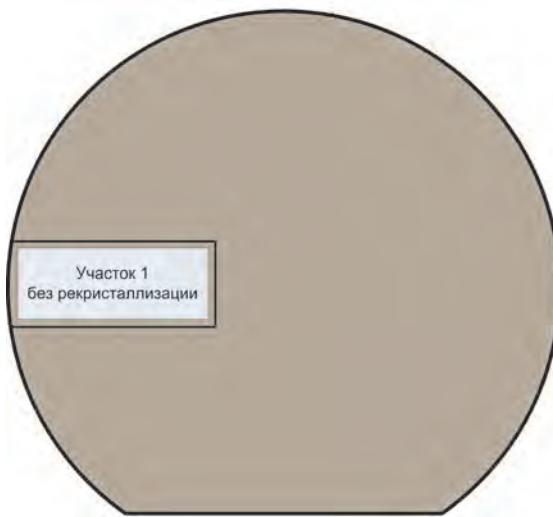
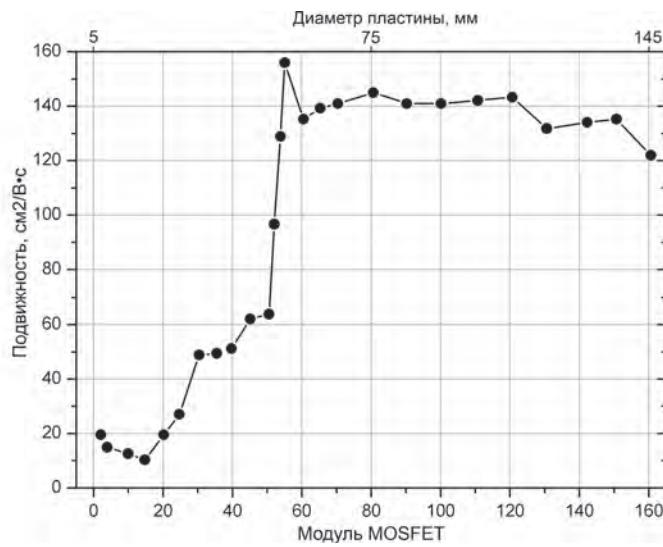
*a**b*

Рис. 4. Схематичное изображение тестовой структуры (а) и значения подвижности в различных модулях вдоль линии главного диаметра пластины, параллельной базовому срезу (б)

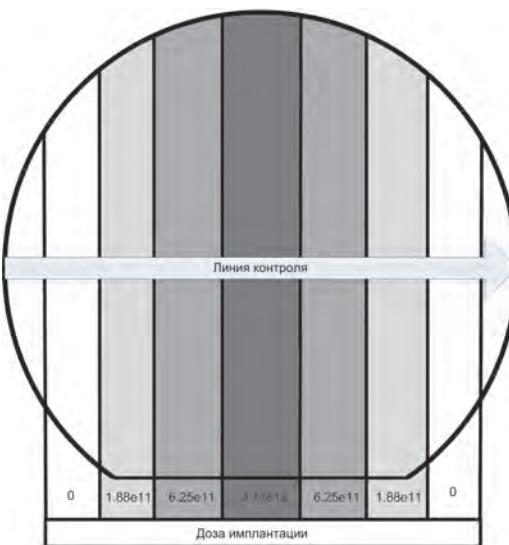
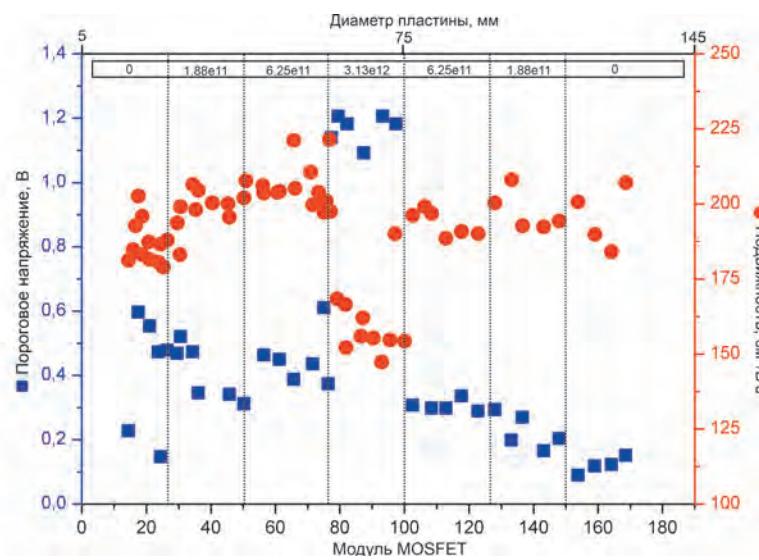
*a**b*

Рис. 5. Схематичное изображение тестовой структуры (а) и значения подвижности в различных модулях вдоль линии главного диаметра пластины, параллельной базовому срезу (б)

Измерение вольт-амперных характеристик на транзисторах с разной длиной затвора продемонстрировало рост драйверных токов с уменьшением длины затвора. Пороговые напряжения по уровню тока 1 мкА составили для транзисторов 204/1 0,5–0,65 В на КНС № 2 и 0,7–0,75 В для транзисторов на КНС № 1. Пробивное напряжение U_{ci} для транзисторов на КНС № 1 принимало значения от 5–6 В по уровню тока 1 мкА до 12–13 В по уровню тока 20 мкА. Для транзисторов на КНС № 2 с неоднородным значением драйверного тока U_{ci} зависело от величины тока открытого транзистора и принимало значения от 5–6 В до 12 В по уровню тока 1 мкА. Изготовленные тестовые транзисторы на ультратонких структурах КНС характеризовались плавным пробоем U_{ci} и наличием формовки, проявляющейся в снижении тока утечки I_{ci} в закрытом состоянии транзистора при выбранном напряжении на затворе.

В целях проверки влияния концентрации носителей в слое на величину подвижности электронов в n-канале на отдельной структуре КНС № 1 было произведено локальное легирование разных областей Si с различной концентрацией бора и энергией 60 КэВ в соответствии с табл. 1. В начале технологического маршрута на ультратонкой структуре КНС был выращен окисел толщиной в 100–200 Å, после чего серией последовательных фотомасок производилось поочередное зонное ионное легирование BF_2 с различной дозой и энергией в 60 КэВ в соответствии с рис. 5б. Далее на структуре КНС с локальными областями различной концентрации бора были изготовлены тестовые кольцевые транзисторы с W/L, равными 204/4 и 80/4 в соответствии с технологическим маршрутом, описанным выше.

Расчет подвижности, проведенный по результатам измерения BAX, был проведен по формулам (1) и (2) на транзисторах



Таблица 2. Результаты измерения порогового напряжения и открытого тока транзисторов $W/L = 80/4$

Концентрация имп. примеси (BF_2), $1/\text{см}^2$	№ измерения	V_t , В (при $V_s = 0$, $V_{ds} = 5$ В, $I_{ds} = 1$ мА)	I_d , мА (при $V_{gs} = V_{ds} = 5$ В)
—	1	0,25	3,8
	2	0,25	4,0
	3	0,25	4,0
$1,88 \cdot 10^{11}$	1	0,25	4,3
	2	0,25	4,3
	3	0,25	4,4
$6,25 \cdot 10^{11}$	1	0,35	5,0
	2	0,35	5,0
	3	0,40	4,5
$3,13 \cdot 10^{12}$	1	0,75	3,6
	2	0,75	4,0
	3	0,70	3,7

с $W/L = 204/4$ при $V_{sd} = 0,1$ В, V_{gs} от 0 до 6 В с шагом 0,2 В. Результаты расчета приведены на рис. 5, при этом было использовано допущение, что

$$\mu_s = \frac{\mu_0}{1 + Q[V_{gi} - V_{t0}]V_{ds}} \quad (3)$$

или

$$\frac{1}{\mu_s} = \frac{1}{\mu_0} + \frac{Q}{\mu_0} [V_{gi} - V_{t0}] \quad (4)$$

при $[V_{gi} - V_{t0}] = 0$ $\mu_s = \mu_0$.

Обнаружено, что при возрастании концентрации носителей в слое до $\sim 3,13 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ подвижность электронов в лучшей точке падает до ~ 150 – $160 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, в то время как значение порогового напряжения возрастает до 1,1–1,25 В (рис. 5б). Как видно из табл. 2, пороговое напряжение п-канального транзистора изменялось в диапазоне 0,25–0,75 В, причем ток открытого состояния слабо зависел от концентрации имплантированной примеси в слое. Из этого следует вывод о том, что подвижность электронов в канале тестового транзистора на КНС определяется не только уровнем легирования, но и другими механизмами рассеяния, такими как общая дефектность эпитаксиального слоя, дефектная граница раздела кремний – сапфир, поверхностные состояния на данной границе и другие.

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты: отражены результаты совместной работы производственной цепочки «изготовитель эпиструктур → изготовитель ИС» в области разработки конкурентоспособной технологии изготовления структур КНС с ультратонким слоем Si, предназначенных для производства СВЧ электроники с малым энергопотреблением. Произведено сравнение структурных характеристик приборного слоя Si и эксплуатационных характеристик тестовых транзисторов между базовыми структурами отечественного (АО «Эпиэл») и импортного производства. Обнаружено, что параметры кристаллической структуры и способ ГФЭ базовых структур КНС определяют будущие эксплуатационные и электрофизические характеристики транзисторов на ультратонких КНС. Использование ТЭР позволило снизить объемную плотность дефектов в слое ультратонкого КНС более чем на два порядка.

ЛИТЕРАТУРА

- Nakamura T., Matsuhashi H., Nagatomo Y. *Silicon on sapphire (SOS) device technology* // Oki technical review, 2004, Is. 200. Vol. 71, № 4. P. 66–69.
- Козлов Ю.Ф., Зотов В.В. Структуры кремния на сапфире: технология, свойства, методы контроля, применение: Уч. пос. — М.: МИЭТ, 2004. — 140 с.: ил.
- Galchev T., Welch W.C., Najafi K. *Low-temperature MEMS process using plasma activated Silicon-On-Silicon (SOS) bonding* // IEEE 20th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), Hyogo, Japan, 21–25 January 2007, IEEE Xplore Digital Library, 2007. P. 309–312.
- Celler G.K., Cristoloveanu S. *Frontiers of silicon-on-insulator* // J. of Applied Physics, 2003. Vol. 93. Is. 9. P. 4955–4978.
- Wang Q.-Y., Nie J.-P., Yu F., Liu Zh.-L., Yu Y.-H. *Improvement of thin silicon on sapphire (SOS) film materials and device performances by solid phase epitaxy* // Materials Science and Engineering: B, 2000. Vol. 72. P. 189–192.
- Fedorov S.D., Sokolov E.M., Statsenko V.N., Timoshenkov S.P., Emelyanov A.V. *Study of the structural properties of silicon-on-sapphire layers in hydride-chloride vapor-phase epitaxy* // Semiconductors, 2017. Vol. 51. № 13. P. 1692–1697.
- Шемухин А.А., Балакшин Ю.В., Черныш В.С., Голубков С.А., Егоров Н.Н., Сидоров А.И. Механизмы дефектообразования и рекристаллизации в пленках кремния на сапфире при ионном облучении // Физика и техника полупроводников, 2014. — Т. 48. — Вып. 4. — С. 535–538.
- Шемухин А.А., Балакшин Ю.В., Черныш В.С., Патракеев А.С., Голубков С.А., Егоров Н.Н., Сидоров А.И., Малюков Б.А., Стасенко В.Н., Чумак В.Д. Формирование ультратонких слоев кремния на сапфире // ПЖТФ, 2012. — Т. 38. — Вып. 19. — С. 83–89.

