

Научная статья

УДК 548.4

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-112-122

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ SiGe-МАТЕРИАЛА С ПРИМЕНЕНИЕМ РЕНТГЕНОВСКОЙ ДИФРАКТОМЕТРИИ И ПРОСВЕЧИВАЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ

Д.В. Зайцев<sup>1</sup>, П.Н. Медведев<sup>1</sup>, Е.А. Лукина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

**Аннотация.** Методами рентгеновской дифрактометрии и просвечивающей электронной микроскопии исследована структура SiGe-материала, применяемого при создании мемристивных структур. Определен фазовый состав материала. Выявлена неоднородность твердого раствора SiGe. Рассчитаны периоды решетки, степени микродеформации решетки и объемные доли фаз твердого раствора. Методами просвечивающей электронной микроскопии исследованы: зеренная структура, распределение фаз и дефектов в объеме зерен. Исследованы дефекты кристаллической решетки, а также с применением локального микрорентгеноспектрального анализа уточнен характер неоднородности твердого раствора SiGe.

**Ключевые слова:** рентгеновская дифрактометрия, просвечивающая электронная микроскопия, кристаллическая решетка, двойники, дефекты упаковки, твердый раствор SiGe, мемристоры

**Для цитирования:** Зайцев Д.В., Медведев П.Н., Лукина Е.А. Исследование структуры SiGe-материала с применением рентгеновской дифрактометрии и просвечивающей электронной микроскопии // Труды ВИАМ. 2022. № 5 (111). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-112-122.

Scientific article

## SiGe STRUCTURE INVESTIGATION USING METHODS OF X-RAY DIFFRACTION AND TRANSMISSION ELECTRON MICROSCOPY

D.V. Zaitsev<sup>1</sup>, P.N. Medvedev<sup>1</sup>, E.A. Lukina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

**Abstract.** The structure of the SiGe material used to create memristive structures has been studied by x-ray diffractometry and transmission electron microscopy. The phase composition of the material has been determined. Revealed the inhomogeneity of the SiGe solid solution. The lattice periods, the degree of lattice microstrain, and the volume fractions of the solid solution phases are calculated. Using transmission electron microscopy, the following have been investigated: grain structure, distribution of phases and defects in the volume of grains. The defects of the crystal lattice have been investigated, and the character of the inhomogeneity of the SiGe solid solution has been refined using local x-ray microanalysis.

**Keywords:** x-ray diffraction, transmission electron microscopy, crystal lattice, twins, stacking faults, SiGe solid solution, memristors

**For citation:** Zaitsev D.V., Medvedev P.N., Lukina E.A. SiGe structure investigation using methods of x-ray diffraction and transmission electron microscopy. *Trudy VIAM*, 2022, no. 5 (111), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-112-122.

### Введение

Материалы на основе кремний-германиевых соединений активно применяются во многих и весьма разнообразных отраслях уже довольно давно. Полупроводниковые SiGe-материалы активно используются в космической индустрии начиная с середины 1970-х гг. Благодаря термоэлектрическим свойствам материал применяется в конструкциях радиоизотопных термоэлектрических генераторов [1], обеспечивающих питание электронных систем беспилотных космических аппаратов, таких как Voyager (1, 2), Galileo, Ulysses, Cassini и New Horizons. В настоящее время полупроводниковые кремний-германиевые материалы раскрывают свои возможности не только в области термоэлектрических свойств [2, 3], но и набирают популярность в высокочастотной электронике. Так, в конце 1980-х – середине 1990-х гг. компания IBM становится лидером по производству сверхвысокочастотных микросхем на базе SiGe гетеропереходных биполярных транзисторов [4], а благодаря развитию данных технологий постоянно совершенствуются системы высокоскоростной беспроводной передачи данных – 5G и 6G [5], оптоволоконные системы и другие структуры, основанные на высокочастотных процессах обработки и передачи информации. Следует отметить интерес к SiGe-материалам со стороны разработчиков квантовых вычислительных систем [6, 7].

В данной работе исследуемый материал представляет интерес как исходный продукт для получения структур, обладающих мемристивными свойствами. Такие структуры смогут применяться в качестве искусственных синапсов при создании нейронных сетей и компьютеров, организация вычислительных процессов которых реализуется непосредственно на элементах памяти [8], аналогично тому, как это осуществляется в биологических нейронных структурах. Если совместить подобные технологии с концепцией энергонезависимой оперативной памяти, работа которой основана на тех же мемристорах, то открывается возможность создания электронно-вычислительных устройств, не требующих загрузки при включении питания, что, в частности, приведет к многократному снижению расхода заряда аккумуляторов портативных устройств. Разработка и исследование мемристивных материалов являются не менее перспективными в области вычислительных систем, а SiGe-материалы, в частности благодаря сегнетоэлектрическим свойствам, нередко рассматриваются в качестве компонентов для построения таких структур [9, 10]. Сегнетоэлектрические свойства SiGe-материала обусловлены спонтанной поляризацией, которая может возникать в отсутствие внешнего электрического поля. Это происходит при изменении суммарного дипольного момента рассматриваемого объема в результате смены направлений отдельных дипольных доменов. При этом наблюдается явление гистерезиса, подобно тому, как это происходит в процессе изменения доменной структуры ферромагнетиков при намагничивании или перемагничивании. Таким образом можно реализовать основное свойство мемристора – изменение его электросопротивления в зависимости от пропускаемых токов, их силы и направления. Другой способ реализации таких свойств материала – это изменение структуры под действием электрического поля и локального воздействия токов. Такой подход актуален для структуры тонких слоев многослойных материалов, где между слоями могут образовываться наноразмерные перемычки из электропроводящих материалов, тем самым уменьшая электросопротивление. Дефекты кристаллической решетки, такие как дислокации, вакансии и границы зерен, напротив, увеличивают электросопротивление, препятствуя протеканию электрического тока. С другой стороны, в структуре сегнетоэлектрика наличие дефектов кристаллической решетки (при определенном расположении) может оказывать влияние на организацию структуры дипольных доменов, улучшая сегнетоэлектрические свойства материала.

В настоящее время не существует предпочтительной технологии изготовления мемристоров и основная задача разработчиков – найти оптимальное сочетание материалов, позволяющих применять различные подходы для достижения эффективных и стабильных результатов по долгосрочному изменению электросопротивления материала под воздействием электрического тока.

Исследование структуры материала и фазового состава проведено с применением двух дифракционных методов: рентгеноструктурного анализа и просвечивающей электронной микроскопии. Преимущества метода рентгеновской дифрактометрии заключаются в получении наиболее полной интегральной информации об относительно небольших объектах. Одно из ценных качеств данного метода – это высокое разрешение в обратном пространстве, что позволяет с высокой точностью определять периоды кристаллической решетки и детально исследовать форму узлов обратной решетки. В результате анализа информации, полученной методами рентгеновской дифрактометрии, можно оценить фазовый состав и структурное состояние материала, включая зеренную структуру, степень наклепа, текстурное состояние и многие другие параметры. Методическая база рентгеновской дифрактометрии имеет всевозможные подходы к исследованию структуры различных материалов [11–13]. Главным недостатком данного метода является относительно низкое пространственное разрешение (в прямом пространстве), в результате чего метод не чувствителен к объектам, размер которых не превышает длину волны рентгеновского излучения. Метод просвечивающей электронной микроскопии, напротив, имеет высокое пространственное разрешение, что позволяет исследовать отдельные фрагменты структуры на уровне атомной решетки, но в то же время он является локальным методом, что накладывает соответствующие ограничения. Сочетание двух методов, обладающих взаимоисключающими недостатками, зачастую позволяет получить исчерпывающую информацию об исследуемом объекте [14–16]. Поскольку основные свойства SiGe-полупроводников во многом зависят от кристаллической структуры, то выбранные методы наилучшим образом подходят для проведения структурных исследований данного материала.

### Материалы и методы

Исследовали образцы материала на основе SiGe. Исследования фазового состава и параметров кристаллической решетки твердого раствора проводили с применением многофункционального дифрактометра EMPYREAN фирмы PanAlytical. Регистрацию дифрактограмм проводили в монохроматическом  $\text{Cu } K_\alpha$ -излучении в геометрии Брэгга–Брентано. Расшифровку дифрактограмм для рентгенофазового анализа проводили с помощью специализированной программы HighScore+ и базы данных PDF2.

Изготовление образцов для исследований структуры с применением методов просвечивающей электронной микроскопии осуществляли следующим образом: из исходного образца SiGe на электроэрозионном станке вырезали пластину толщиной 0,5 мм. Полученную пластину нарезали на диски  $\varnothing 3$  мм под размер стандартного держателя для просвечивающего электронного микроскопа. Диски механически утоняли до толщины 80–100 мкм и подвергали двухсторонней полировке сфокусированными пучками ионов аргона на установке TEM-Mill фирмы Fishione при углах наклона ионных пушек +6,5 и –5,5 градусов относительно плоскости образца и ускоряющем напряжении 4 кВ. Исследования структуры образца проводили методами просвечивающей электронной микроскопии при ускоряющем напряжении 200 кВ на микроскопе Tescan G2 F20 S-TWIN, оснащенный энергодисперсионным анализатором X-Max80.

## Результаты и обсуждение

### Рентгеновский фазовый анализ

Проведен анализ фазового состава исследованного образца по дифракционному спектру (рис. 1). Обнаружена основная фаза твердого раствора на основе Si с кубической решеткой типа алмаза, дополнительные фазы представлены в следовом количестве: SiO<sub>2</sub>, FeSi, FeSi<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>Ge. Информация об обнаруженных фазах представлена в табл. 1.

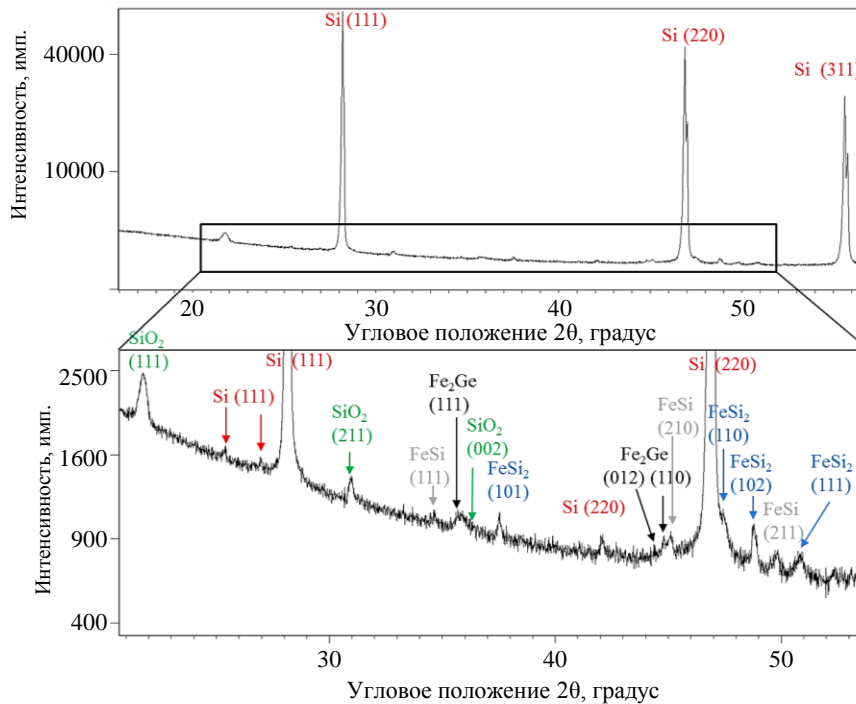


Рис. 1. Дифракционный спектр исследованного образца

Таблица 1

Карточки обнаруженных фаз из базы данных PDF2

Название фазы	Химическая формула	Кристаллическая решетка
Кремний	Si	Кубическая
Силицид железа	FeSi	Кубическая
Оксид кремния	SiO <sub>2</sub>	Кубическая
Германид железа	Fe <sub>1,95</sub> Ge	Гексагональная
Силицид железа	FeSi <sub>2</sub>	Тетрагональная

### Рентгеновский структурный анализ

При визуальном анализе профиля рентгеновских линий твердого раствора Si(Ge) с гранцентрированной кубической решеткой типа «алмаз» обнаружена асимметрия пиков в сторону меньших углов. Это указывает на наличие неоднородности твердого раствора. Для того чтобы более детально исследовать этот аспект, проведен полнопрофильный анализ спектра твердого раствора Si(Ge). Данный анализ проведен в два этапа:

– на *этапе 1* проводится выбор количества фаз типа Si<sub>x</sub>Ge<sub>1-x</sub> для описания асимметрии, уточнение их параметров решетки, области когерентного рассеяния (ОКР) и степени микродеформации решетки ( $\epsilon$ );

– на *этапе 2* проводится количественный анализ твердого раствора типа  $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$  для уточнения объемной доли фаз.

На *этапе 1* выбраны две фазы типа  $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$  с разным параметром решетки. Профиль линии описывается функцией Войта (свертка функций Гаусса и Лоренца), а уточнение полуширины рефлексов – функцией Каглиоти:

$$\beta^2 = W \operatorname{tg}(\theta)^2 + V \operatorname{tg}(\theta) + U,$$

где  $\beta$  – ширина пика на половине его высоты (полуширина);  $\theta$  – угол отражения;  $U, V, W$  – уточняемые параметры.

На данном этапе уточнение интенсивности линий проводится для каждой линии отдельно (уточнение по Паули).

В итоге рассчитаны периоды решеток, ОКР и  $\varepsilon$  для каждой из фаз  $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$  (табл. 2). Две фазы удовлетворительно описывают наблюдаемую асимметрию профиля. На рис. 2 представлены линии  $hkl$  – (062) и (353), для которых асимметрия линий наиболее заметна.

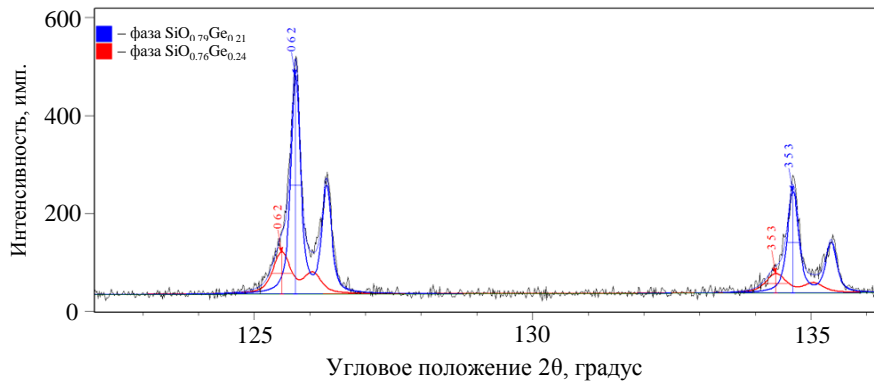


Рис. 2. Часть дифракционного спектра, иллюстрирующая разделение асимметричных линий фазы типа  $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$

По корреляционной зависимости параметра решетки и концентрации кремния в фазе типа  $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$  из полученных параметров рассчитаны относительные содержания каждой из фаз. Оценены также плотности фаз по данным параметра решетки и их содержанию  $x$ .

Молярная масса фазы типа  $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ :

$$M(\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}) = M(\text{Si}) \cdot x + M(\text{Ge}) \cdot (1-x);$$

плотность:

$$\rho_{\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}} = \frac{z \cdot M_{\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}}}{N_A \cdot a_{\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}}^3},$$

где  $z = 8$  – число атомов, приходящихся на элементарную ячейку типа «алмаз»;  $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup> – число Авогадро;  $a$  – период решетки.

На *этапе 2* в модели фаз вносят данные по содержанию Si и Ge в виде соответствующей заселенности узлов решетки типа «алмаз». Уточнение проводится по методу Ритвельда, при котором расчет интенсивности линий получается путем моделирования рассеяния от атомов в решетке. В результате данного расчета получены объемные доли фаз  $\text{Si}_{0.76}\text{Ge}_{0.24}$  и  $\text{Si}_{0.79}\text{Ge}_{0.21}$  (табл. 2).

Таблица 2

Результаты рентгеноструктурного анализа фаз типа  $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ 

Параметр	Значения параметров для фаз	
	$\text{Si}_{0,79}\text{Ge}_{0,21}$	$\text{Si}_{0,76}\text{Ge}_{0,24}$
Содержание фазы $x$ , % (атомн.)	79,41	76,70
Период решетки $a$ , нм	0,547326	0,547898
Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	3,02	3,11
Размер области когерентного рассеяния $D$ , нм	42,1	25,4
Степень микродеформации решетки $\varepsilon$ , %	0,031	0,029
Объемная доля фазы $\Delta V/V$ , %	71,8	28,2

Зависимости параметра решетки (также как и плотности) от концентрации Si в фазе типа  $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$  имеет отклонение от линейности (закона Вегарда) и лучшим образом аппроксимируется полиномом второй степени (рис. 3).

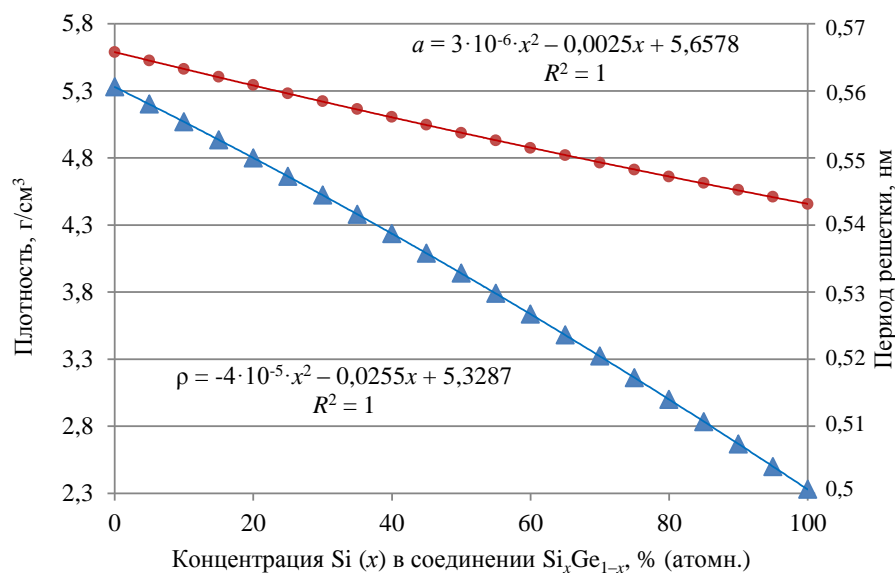


Рис. 3. Зависимость плотности (▲) и параметра решетки (●) от концентрации Si в твердом растворе  $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$

#### Просвечивающая электронная микроскопия

Снимки структуры при относительно небольших увеличениях (до  $\times 100000$ ) получены в условиях дифракционного контраста. Интенсивность элементов структуры на изображении зависит от ориентировки их кристаллической решетки относительно пучка электронов. На границах зерен и частично в объеме наблюдаются фрагменты структуры, где преобладает абсорбционный контраст, формирующийся в данном случае в результате неоднородности толщины фольги (рис. 4). Такие фрагменты, по-видимому, представляют собой поры, размер которых не превышает 500 нм. Кроме относительно крупных включений и пор в объеме зерен можно наблюдать контраст на элементах структуры, размер которых составляет  $\sim 50$  нм и менее. Такого рода контраст обычно формируется на когерентных выделениях или на дислокационных петлях и обусловлен упругими искажениями кристаллической решетки матрицы вблизи объекта. Распределение таких объектов в объеме зерна неравномерно, вблизи границ зерен их плотность снижается. Границы зерен, как известно, являются стоком вакансий, из чего можно

предположить, что наблюдаемые объекты являются дислокационными петлями, образовавшимися вокруг скоплений вакансий.

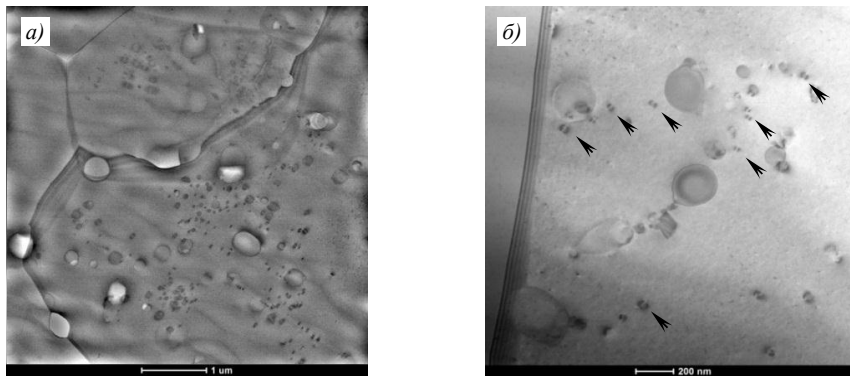


Рис. 4. Общий вид структуры SiGe-материала: *a* – зеренная структура; *б* – дислокационные петли в объеме зерна (направления стрелок соответствуют действующему вектору дифракции электронов)

Для определения химического состава элементов структуры, наблюдаемых в объеме зерен, проведен локальный элементный анализ с построением профилей распределения химических элементов вдоль линии (рис. 5). Наиболее крупные образования в объеме зерен являются оксидами кремния. Другие частицы содержат железо, фосфор и иногда хром (рис. 5, *a*). Для уточнения характера неоднородности твердого раствора, выявленной методом рентгеноструктурного анализа, проведен анализ профилей распределения элементов вдоль линии, пересекающей несколько зерен (рис. 5, *б*). На профилях распределения результат представлен в атомных процентах для удобства восприятия. Профили при этом в меньшей степени зависят от толщины фольги, что облегчает анализ распределения элементов в структуре материала. Тем не менее изменение толщины фольги вдоль линии профиля все-таки оказывает влияние на конечный результат. Это связано с различной степенью поглощения характеристического излучения в фольге. Для того чтобы убедиться, что изменение соотношения атомных процентов Si к Ge на профилях распределения не является результатом снижения интенсивности характеристического излучения Si при поглощении на более толстом участке фольги, проанализированы профили интегральных интенсивностей различных спектральных линий Ge и Si (рис. 5, *в*).

Из представленных профилей интегральных интенсивностей видно, что фольга имеет неоднородности по толщине (общая тенденция изменения интенсивности спектральных линий химических элементов, представляющих основу твердого раствора SiGe). При этом *l*-серия Ge, обладающая меньшей энергией (~1,18 кэВ) по сравнению с *k*-серией Si (~1,73 кэВ), имеет в среднем почти такую же интенсивность, как и в соседнем зерне, тогда как интенсивность линии Si заметно изменяется при переходе через границу двух зерен (на границе зерен расположен оксид кремния, в результате чего интенсивности линий германия значительно ниже в данной области). В целом неоднородность твердого раствора, определенная методом локального микрорентгеноспектрального анализа, сопоставима с рассчитанной в результате рентгеноструктурного анализа.

Оксиды на границах зерен могут являться местами зарождения двойников, пересекающих объем зерна. В некоторых случаях ширина двойников не превышает 5 нм. На снимке прямого разрешения такого двойника (рис. 6) отмечены кристаллографические направления (которые в кубической решетке нормальны соответствующим плоскостям) и элементарные ячейки алмазной кристаллической решетки, которые можно упрощенно рассматривать как гранецентрированную кубическую решетку.

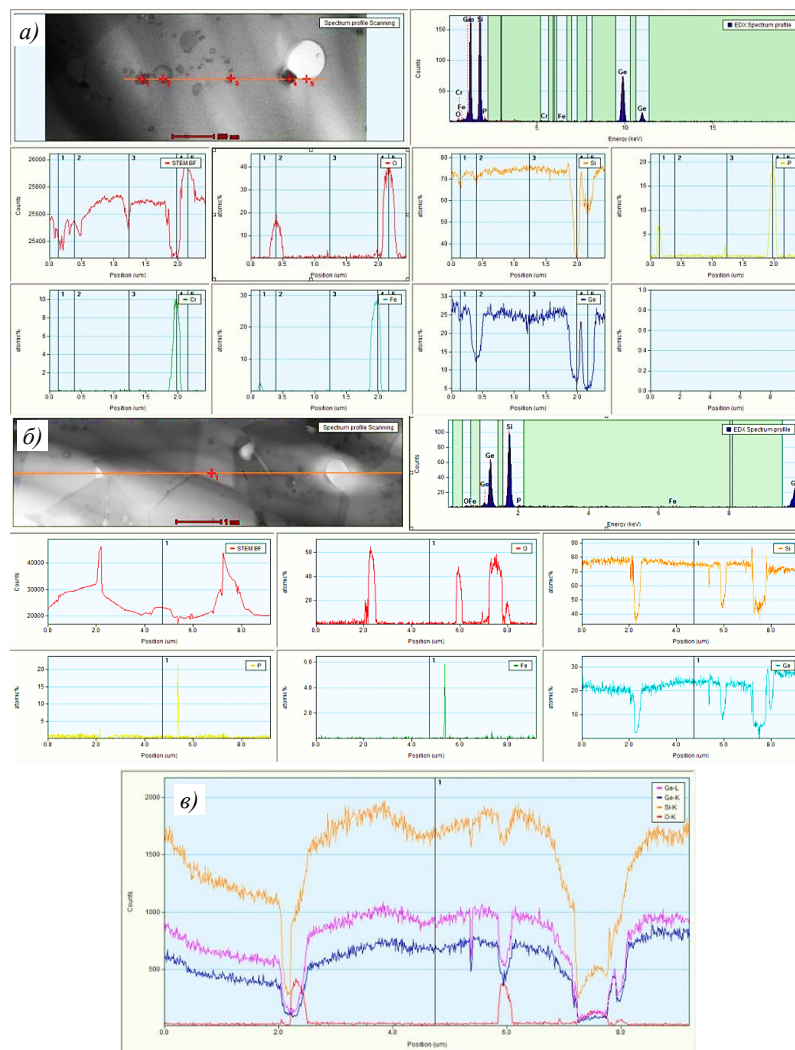


Рис. 5. Профили распределения химических элементов в структуре образца: *а*, *б* – распределение (в % (атомн.)) элементов в объеме зерна и в соседних зернах соответственно; *в* – профили интенсивностей спектральных линий Si(*k*), Ge(*l*), Ge(*k*) и O(*k*), соответствующих профилям на (*б*)

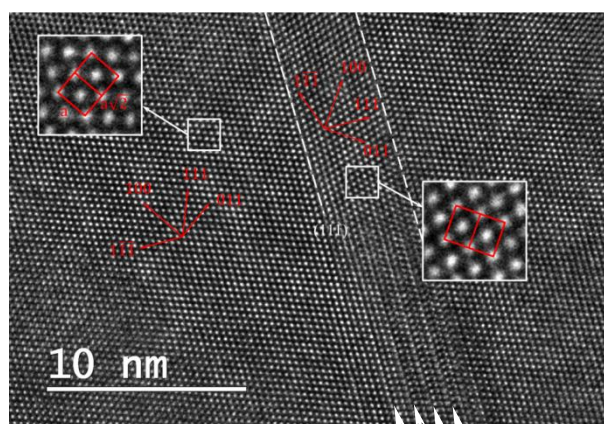


Рис. 6. Двойник в объеме зерна (прямое разрешение)

На снимке прямого разрешения видна переходная зона, в которой двойник еще не сформирован. В данной области можно наблюдать дефекты упаковки (указаны стрелками в нижней части снимка) в плоскостях (111), параллельных плоскости двойникования.

Дефекты упаковки, вакансионные диски, которые под воздействием внешних сил (при достижении критических размеров) также могут образовывать дефекты упаковки, и другие неоднородности в кристаллической структуре материала могут оказывать влияние на его электрические свойства, в том числе и на спонтанную поляризацию, что является одним из ключевых моментов в разработке мемристивных структур.

### **Заключения**

С применением методов рентгеновской дифрактометрии и просвечивающей электронной микроскопии проведены исследования структуры материала на основе SiGe, полученного методом спекания гранул. Методом рентгеновского фазового анализа выявлены следующие фазы: FeSi, SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>1,95</sub>Ge и FeSi<sub>2</sub>. Методом локального микро-рентгеноспектрального анализа установлено, что в состав некоторых фаз входят P и Cr. В структуре материала обнаружены различного рода дефекты, в том числе поры на границах и в объеме зерен, а также дефекты кристаллической решетки, такие как скопления вакансий, дефекты упаковки и двойники. Отмеченные дефекты кристаллической решетки могут оказывать влияние на спонтанную поляризацию материала, что подтверждает возможность его применения при создании мемристивных структур. Методами рентгеноструктурного анализа и локального микро-рентгеноспектрального анализа установлено наличие неоднородности твердого раствора SiGe, которая проявляется на межзеренном уровне. Такую особенность следует учитывать при использовании данного материала для получения многослойных мемристивных структур методом напыления.

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 19-29-03055.*

### **Список источников**

1. Bennett G.L., Lombardo J.J., Hemler R.J. et al. Mission of Daring: The General-Purpose Heat Source Radioisotope Thermoelectric Generator // 4th International Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit (IECEC). 2006. P. 26–29. DOI: 10.2514/6.2006-4096.
2. Joshi G., Lee H., Lan Y. et al. Enhanced Thermoelectric Figure-of-Merit in Nanostructured p-Type Silicon Germanium Bulk Alloys // Nano Letters. 2008. Vol. 8. Is. 12. P. 4670–4674. DOI: 10.1021/nl8026795.
3. Wang X.W., Lee H., Lan Y.C. et al. Enhanced Thermoelectric Figure of Merit in Nanostructured n-Type Silicon Germanium Bulk Alloy // Applied Physics Letters. 2008. Vol. 93. Is. 19. P. 3121. DOI: 10.1063/1.3027060.
4. Hameed D.L., Meyerson B.S. The early history of IBM's SiGe mixed signal technology // IEEE Transactions on Electron Devices. 2001. Vol. 48. No. 11. P. 2555–2567. DOI: 10.1109/16.960383.
5. Chevalier P., Gianesello F., Pallotta A. et al. PD-SOI CMOS and SiGe BiCMOS Technologies for 5G and 6G communications // 2020 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM). 2020. P. 34.4.1–34.4.4. DOI: 10.1109/IEDM13553.2020.9371954.
6. Hofmann A., Jirovec D., Borovkov M. et al. Assessing the potential of Ge/SiGe quantum dots as hosts for singlet-triplet qubits. URL: <https://arxiv.org/pdf/1910.05841.pdf> (дата обращения: 24.01.2022). DOI: 10.48550/arXiv.1910.05841.
7. Martin S., Vivekananda P.A., Markus B. et al. Investigating microwave loss of SiGe using superconducting transmon qubits // Applied Physics Letters. 2021. Vol. 118. Is. 12. P. 4001. DOI: 10.1063/5.0038087.
8. Ventra M.D., Pershin Y.V. Memcomputing: a computing paradigm to store and process information on the same physical platform // Nature Physics. 2013. Vol. 9. P. 200–202. DOI: 10.48550/arXiv.1304.1675.
9. Choi S., Tan S.H., Li Z. et al. SiGe epitaxial memory for neuromorphic computing with reproducible high performance based on engineered dislocations // Nature Materials. 2018. Vol. 17. P. 335–340. DOI: 10.1038/s41563-017-0001-5.

10. Keonhee K., Dae K., Yeonjoo J. et al. Ion Beam-Assisted Solid Phase Epitaxy of SiGe and its Application for Analog Memristors // *Journal of Alloys and Compounds*. 2021. Vol. 884. P. 161086. DOI: 10.1016/j.jallcom.2021.161086.
11. Каблов Е.Н., Кашапов О.С., Медведев П.Н., Павлова Т.В. Исследование двухфазного титанового сплава системы Ti–Al–Sn–Zr–Si– $\beta$ -стабилизаторы // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 1 (58). С. 30–37. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-30-37.
12. Александров Д.А., Мубояджян С.А., Луценко А.Н., Журавлева П.Л. Упрочнение поверхности титановых сплавов методом ионной имплантации и ионного модифицирования // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 2 (51). С. 33–39. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-33-39.
13. Каблов Е.Н. Роль фундаментальных исследований при создании материалов нового поколения // Тез. докл. XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии: в 6 т. СПб., 2019. Т. 4. С. 24.
14. Каблов Е.Н., Лукина Е.А., Заводов А.В., Ефимочкин И.Ю. Формирование структуры твердых сплавов на основе системы WC–Co с субмикронным зерном в присутствии ингибирующих добавок // *Труды ВИАМ*. 2020. № 4–5 (88). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.01.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-45-89-99.
15. Бенариев И., Бер Л.Б., Антипов К.В., Сбитнева С.В. Тенденции развития деформируемых сплавов системы Al–Mg–Si–(Cu). Часть 1 (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*, 2019. № 3 (56). С. 14–22. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-14-22.
16. Тренингов И.А., Заводов А.В., Петрушин Н.В. Исследование кристаллической структуры и микроструктуры жаропрочного никелевого сплава ЖС32-ВИ, синтезированного методом селективного лазерного сплавления, после высокотемпературных механических испытаний // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 1 (54). С. 57–65. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-57-65.

#### References

1. Bennett G.L., Lombardo J.J., Hemler R.J. et al. Mission of Daring: The General-Purpose Heat Source Radioisotope Thermoelectric Generator. *4th International Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit (IECEC)*, 2006, pp. 26–29. DOI: 10.2514/6.2006-4096.
2. Joshi G., Lee H., Lan Y. et al. Enhanced Thermoelectric Figure-of-Merit in Nanostructured p-Type Silicon Germanium Bulk Alloys. *Nano Letters*, 2008, vol. 8, is. 12, pp. 4670–4674. DOI: 10.1021/nl8026795.
3. Wang X.W., Lee H., Lan Y.C. et al. Enhanced Thermoelectric Figure of Merit in Nanostructured n-Type Silicon Germanium Bulk Alloy. *Applied Physics Letters*, 2008, vol. 93, is. 19, pp. 3121. DOI: 10.1063/1.3027060.
4. Harnme D.L., Meyerson B.S. The early history of IBM's SiGe mixed signal technology. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2001, vol. 48, no. 11, pp. 2555–2567. DOI: 10.1109/16.960383.
5. Chevalier P., Gianesello F., Pallotta A. et al. PD-SOI CMOS and SiGe BiCMOS Technologies for 5G and 6G communications. *2020 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)*, 2020, pp. 34.4.1–34.4.4. DOI: 10.1109/IEDM13553.2020.9371954.
6. Hofmann A., Jirovec D., Borovkov M. et al. *Assessing the potential of Ge/SiGe quantum dots as hosts for singlet-triplet qubits*. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1910.05841.pdf> (accessed: January 24, 2022). DOI: 10.48550/arXiv.1910.05841.
7. Martin S., Vivekananda P.A., Markus B. et al. Investigating microwave loss of SiGe using superconducting transmon qubits. *Applied Physics Letters*, 2021, vol. 118, is. 12, pp. 4001. DOI: 10.1063/5.0038087.
8. Ventra M.D., Pershin Y.V. Memcomputing: a computing paradigm to store and process information on the same physical platform. *Nature Physics*, 2013, vol. 9, pp. 200–202. DOI: 10.48550/arXiv.1304.1675.
9. Choi S., Tan S.H., Li Z. et al. SiGe epitaxial memory for neuromorphic computing with reproducible high performance based on engineered dislocations. *Nature Materials*, 2018, vol. 17, pp. 335–340. DOI: 10.1038/s41563-017-0001-5.

10. Keonhee K., Dae K., Yeonjoo J. et al. Ion Beam-Assisted Solid Phase Epitaxy of SiGe and its Application for Analog Memristors. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, vol. 884, pp. 161086. DOI: 10.1016/j.jallcom.2021.161086.
11. Kablov E.N., Kashapov O.S., Medvedev P.N., Pavlova T.V. Study of a  $\alpha + \beta$ -titanium alloy based on a system of Ti–Al–Sn–Zr–Si– $\beta$ -stabilizing alloying elements. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 30–37. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-30-37.
12. Aleksandrov D.A., Muboyadzhyan S.A., Lutsenko A.N., Zhuravleva P.L. Hardening of the surface of titanium alloys by ion implantation method and ionic modification. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 2 (51), pp. 33–39. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-33-39.
13. Kablov E.N. The role of fundamental research in the creation of new generation materials. *Reports of XXI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*: in 6 vols. St. Petersburg, 2019, vol. 4, pp. 24.
14. Kablov E.N., Lukina E.A., Zavodov A.V., Efimochkin I.Yu. The formation of structure in ultrafine WC–Co carbide material in the presence of inhibitory additives. *Trudy VIAM*, 2020, no. 4–5 (88), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 24, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-45-89-99.
15. Benarieb I., Ber L.B., Antipov K.V., Sbitneva S.V. Trends in development of wrought alloys of Al–Mg–Si–(Cu) system. Part 1 (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 3 (56), pp. 14–22. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-14-22.
16. Treninkov I.A., Zavodov A.V., Petrushin N.V. Research of crystal structure and microstructure of the ZhS32-VI nickel-base superalloy synthesized by selective laser fusion method, after high-temperature mechanical tests. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 1 (54), pp. 57–65. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-57-65.

**Информация об авторах**

**Зайцев Денис Владимирович**, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Медведев Павел Николаевич**, начальник сектора, к.ф.-м.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Лукина Ева Александровна**, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Information about the authors**

**Denis V. Zaitsev**, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Pavel N. Medvedev**, Head of Sector, Candidate of Sciences (Phys. & Math.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Eva A. Lukina**, Head of the Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 03.02.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 14.02.2022.

The article was submitted 03.02.2022; approved and accepted for publication after reviewing 14.02.2022.