

УДК 621.315.592

DOI 10.25205/2541-9447-2020-15-2-84-91

## Получение и морфологические исследования эпитаксиальных слоев твердого раствора $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$

А. С. Саидов<sup>1</sup>, А. Ш. Раззоков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А. В. Стародубцева АН РУз  
Ташкент, Узбекистан

<sup>2</sup> Ургенчский государственный университет  
Ургенч, Узбекистан

### Аннотация

Показан выбор оптимального режима технологического процесса роста эпитаксиальных слоев твердых растворов  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  из оловянного и галлиевого раствора – расплава на подложку Si<111> с наименьшими плотностями дислокаций, которые достигнуты нами экспериментально. Обнаружена экспоненциальная зависимость между величинами плотности дислокации и толщины пленки. С плавным переменным составом структуры, соответственно плавно изменяя параметры решетки варизонного твердого раствора, получены структурно совершенные эпитаксиальные слои  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  ( $0 < x < 1$ ).

### Ключевые слова

эпитаксия, кристаллизация, раствор-расплав, твердый раствор, гетероструктура, дислокация, подложка

### Источник финансирования

Работа выполнена по гранту ФА-Ф2-003 АН РУз: «Фото-, термоэлектрические и излучательные эффекты в новых многокомпонентных твердых растворах с нанокристаллами на основе молекул элементарных полупроводников и полупроводниковых соединений»

### Для цитирования

Саидов А. С., Раззоков А. Ш. Получение и морфологические исследования эпитаксиальных слоев твердого раствора  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  // Сибирский физический журнал. 2020. Т. 15, № 2. С. 84–91. DOI 10.25205/2541-9447-2020-15-2-84-91

## Preparation and Morphological Studies of Epitaxial Layers of a Solid Solution $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$

A. S. Saidov<sup>1</sup>, A. Sh. Razzokov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Physics and Technology Institute named after S. V. Starodubtsev AS RUz  
Tashkent, Uzbekistan

<sup>2</sup> Urgench State University  
Urgench, Uzbekistan

### Annotation

The article shows the selection of the optimal process regime for the growth of epitaxial layers of  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  solid solutions from tin and gallium solution – melt on a Si<111> substrate, with the lowest dislocation densities that we experimentally achieved. An exponential relationship was found between the values of the dislocation density and the film thickness. With a smooth variable composition of the structure, respectively, by smoothly changing the lattice parameters of the graded-gap solid solution, structurally perfect epitaxial layers  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  ( $0 < x < 1$ ) were obtained.

### Keywords

epitaxy, crystallization, melt solution, solid solution, heterostructure, dislocation, substrate

© А. С. Саидов, А. Ш. Раззоков, 2020

ISSN 2541-9447

Сибирский физический журнал. 2020. Том 15, № 2  
Siberian Journal of Physics, 2020, vol. 15, no. 2

### Funding

The work was carried out under the grant FA-F2-003 of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan: "Photo-, thermoelectric and radiative effects in multicomponent solid solutions with nanocrystals based on molecules of elementary semi-conductors and semiconductor compounds"

### For citation

Saidov A. S., Razzokov A. Sh. Preparation and Morphological Studies of Epitaxial Layers of a Solid Solution  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ . *Siberian Journal of Physics*, 2020, vol. 15, no. 2, p. 84–91. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2020-15-2-84-91

Одним из способов получения эпитаксиальных слоев в полупроводниковом приборостроении является их кристаллизация из растворов-расплавов, называемая жидкофазной эпитаксией (ЖФЭ), который дает возможность их получения с разным содержанием компонентов состава.

Растворитель может быть расплавом одного из основных компонентов кристаллизующегося соединения и твердого раствора, например, расплав галлия при получении эпитаксиальных слоев  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ . Им может служить также расплав легкоплавкого легирующего элемента, например расплав олова при получении легированных оловом эпитаксиальных слоев  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ .

В настоящее время для создания полупроводниковых приборов используют гетероструктуры на основе твердых растворов соединений класса  $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{IV}}$ . Преимущество двухкомпонентных твердых растворов состоит в возможности сохранения кристаллически совершенной структуры, при плавном и незначительном изменении вдоль направления роста периода кристаллической решетки  $a$  пленок и изменении ширины запрещенной зоны  $E_g$  [1–4].

Однако обычно полупроводники и полученные гетероструктуры на их основе этого класса имеют существенный недостаток, заключающийся в рассогласовании величины параметра решетки  $a$  и коэффициентов термического расширения  $\alpha$  (КТР) подложки и кристаллизующего слоя ( $a_{\text{Si}} = 5,4307 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ ,  $a_{\text{Ge}} = 5,66 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ ,  $\alpha_{\text{Si}} = 5,1 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ ,  $\alpha_{\text{Ge}} = 6,1 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ ). Из-за этого в пленке образуется множество дефектов.

При выращивании дву- и многокомпонентных твердых растворов из жидкой фазы наиболее существенный вклад в дефектообразование вносят следующие факторы: различие периодов решеток  $\Delta a$  и КТР  $\Delta \alpha$ , сопрягающихся на границе материалов; неоднородность состава вдоль толщины эпитаксиальных слоев  $dC/dx$ . А также значительную роль в дефектообразовании двухкомпонентных гетероструктур играет наследование дефектов подложки. На дефектах происходит рассеивание носителей заряда, что значительно ухудшает характеристики полупроводниковых приборов, изготовленных на их основе.

Для получения гетероструктуры, согласованной по периоду кристаллической решетки и КТР, необходим переход к двухкомпонентным плавно изменяющимся варизонным составам твердых растворов.

Использование полупроводниковых твердых растворов  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , выращенных на подложках кремния, позволяет регулировать ширину запрещенной зоны  $E_g$ , период решетки  $a$ , а также КТР  $\alpha$ , что особенно важно для приборов, основанных на излучательной рекомбинации.

В связи с этим исследование твердых растворов  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , выращенных на подложках кремния (который является дешевым полупроводниковым материалом по сравнению с остальными), является весьма актуальным.

Плавно изменяя состав твердого раствора  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , можно управлять параметрами твердого раствора, такими как ширина запрещенной зоны и область спектральной фоточувствительности. Например, если синтезировать твердый раствор, состоящий из компонентов кремния и германия, то этот твердый раствор, имея свою собственную ширину запрещенной зоны, охватывает более широкую область спектральной фоточувствительности, чем области спектральной фоточувствительности кремния и германия. Это имеет большое значение для

изготовления фотоэлектрических приборов, а также служит буферным слоем для получения структур  $\text{Si} - (\text{Si}_2)_{1-x-y} (\text{Ge}_2)_x (\text{GaAs})_y$ ,  $\text{Si} - \text{Si}_{1-x} \text{Ge}_x - (\text{Ge}_2)_{1-x} (\text{GaAs})_x$  и др. [5; 6].

Кроме того, для интенсивного развития микроэлектроники необходимы полупроводники со значительно более высокими, чем у кремния Si, пробивными электрическими полями, шириной запрещенной зоны, большей подвижностью электронов и устойчивые к высоким температурам.

Нами были выращены эпитаксиальные пленки твердого раствора  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  методом жидкофазной эпитаксии во всем интервале концентраций из ограниченного оловянного и галлиевого раствора-расплава ( $0 < x < 1$ ) на монокристаллических подложках Si с диаметром 40 мм и толщиной ~ 400 мкм.

Для выращивания твердого раствора  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  нами был использован кварцевый реактор вертикального типа с горизонтально расположенными подложками на установке типа ЭПОС. Рост эпитаксиального слоя осуществлялся из малого объема оловянного и галлиевого раствора-расплава, ограниченного двумя подложками, в атмосфере очищенного палладием водорода, что дало возможность минимизировать количество расходуемого раствора-расплава. Сначала в реакторе создавали вакуум до остаточного давления  $10^{-2}$  Па, затем в течение 20 мин через реактор пропускался очищенный водород, и после этого начинался процесс нагревания. Когда температура доходила до необходимого значения, система переключалась в автоматический режим. В течение 40–60 мин производилась гомогенизация раствора-расплава. Потом подложки на графитовом держателе приводились в контакт с раствором-расплавом и после заполнения зазоров между подложками раствором-расплавом поднимались на 1 см выше уровня раствора. Рост эпитаксиальных слоев  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  в нужный момент прекращался сливом раствора-расплава с подложек при помощи центрифуги. Состав раствора-расплава, состоящего из Si, Ge и Sn, а также Si, Ge и Ga, определялся из диаграммы состояния двойного сплава Sn–Si, Sn–Ge и Ga–Si, Ga–Ge. Для приготовления жидкого раствора-расплава была изучена растворимость Si и Ge в Sn в интервале температур 442–1100 °С [7; 8]. Эпитаксиальные пленки  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  выращивались при температуре начала и окончания кристаллизации соответственно в интервале 1050–450 °С. Образцы выращивались при различных значениях технологических параметров жидкостной эпитаксии.

С целью установления зависимости качества пленок от состава, температуры начала кристаллизации и скорости принудительного охлаждения были проведены эксперименты с изменением необходимых параметров. Исследования показали, что наиболее качественные эпитаксиальные пленки твердого раствора  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  получают при охлаждении раствора-расплава со скоростью 0,5–1,5 град/мин, толщине раствора-расплава (т. е. ширине зазора между двумя горизонтально расположенными подложками) 0,75–1,5 мм. В качестве подложек были использованы монокристаллические Si(111) с отклонением  $-(0^\circ 15' \div 0^\circ 30')$  *n*-типа проводимости.

С помощью металлографического микроскопа МИМ-8М была исследована морфология поверхности полученных пленок. Нами подобран состав травителя (использовались смеси концентрированных плавиковой (HF), азотной (HNO<sub>3</sub>) и уксусной (CH<sub>3</sub>COOH) кислот в соотношениях  $1\text{чHF} + 3\text{чHNO}_3 + 4\text{чCH}_3\text{COOH}$ ). Для выявления дислокационных ямок травления на плоскости (111) образцы подвергали травлению в растворе, затем травитель разбавляли деионизованной водой и промывали. Для определения плотности дислокаций ( $N_D$ ), на каждом послойном образце было сделано 6–7 подсчетов.

Полученные экспериментальные данные показали, что плотность дислокаций ( $N_D$ ) выращенных полупроводниковых твердых растворов  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  зависит от всех технологических параметров: от температуры роста, скорости принудительного охлаждения, ориентации и чистоты подложек, типа растворителя. Содержание кремния, начиная с границы подложка-пленка  $\text{Si} - \text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  вдоль направления роста уменьшается, соответственно содержание германия увеличивается, и таким образом выращиваем варизонные эпитаксиальные слои,

у которых ширина запрещенной зоны ( $\Delta E$ ) изменяется плавно, начиная от кремния ( $\Delta E_{\text{Si}} = 1,12$  эВ) и заканчивая германием  $\Delta E_{\text{Ge}} = 0,67$  эВ).

На рис. 1 приведены результаты морфологического исследования поверхности пленок отдельных 4 образцов, выращенных из оловянного и галлиевого раствора-расплава при температуре начала ( $T_{\text{НК}}$ ) и прекращения ( $T_{\text{ПК}}$ ) кристаллизации.

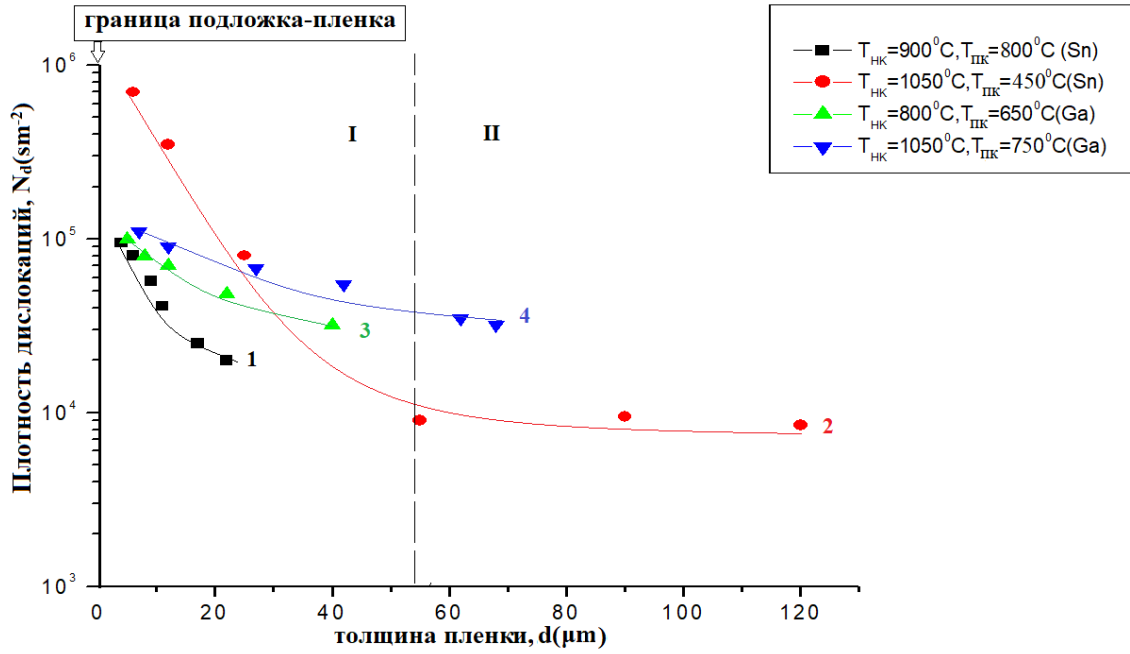


Рис. 1. Зависимость плотности дислокаций ( $N_i$ ) эпитаксиальных слоев твердого раствора  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  от толщины ( $d$ ) (соответственно от содержания компонентов кремния и германия в составе) пленок, выращенных из оловянного и галлиевого раствора-расплава при разных температурах начала ( $T_{\text{НК}}$ ) и прекращения ( $T_{\text{ПК}}$ ) кристаллизации  
 Fig. 1. Dependence of the dislocation density ( $N_i$ ) of epitaxial layers of the  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  solid solution on the thickness ( $d$ ) (respectively, on the content of silicon and germanium components in the composition) of films grown from tin and gallium solution-melt at different temperatures of the beginning ( $T_{\text{bc}}$ ) and termination ( $T_{\text{tc}}$ ) crystallization

Из рис. 1, видно, что зависимость концентрации плотности дислокаций в пленке от толщины и соответственно от содержания состава твердого раствора является экспоненциальной и определяется формулой  $N_i = ae^{bd}$  (I участка на рисунке). Коэффициент  $a$  и степенной коэффициент  $b$  зависят от содержания компонентов кремния или германия в твердом растворе, поэтому рассматриваются как некоторые математические функции, зависящие от состава пленки:

$$a(x, y) = (\psi_{i1}x + \psi_{i2}y) \cdot 10^\gamma,$$

$$b(x, y) = (\psi_{i3}x + \psi_{i4}y),$$

$$N_{i0}(x, y) = (\psi_{i5}x + \psi_{i6}y) \cdot 10^\delta,$$

где  $\gamma > 0, \delta > 0$ .

Коэффициенты  $\psi_{ik}$  и степень  $\gamma, \delta$  могут быть положительными или отрицательными, определяются с помощью эксперимента ( $i$  – номер образца,  $x, y$  – соответственно содержание кремния и германия в твердом растворе).

С использованием теоретических расчетов и экспериментальных данных установлено, что концентрация плотности дислокаций в пленке убывает экспоненциально, вдоль направления толщины твердого раствора до определенного (I участка на рис. 1) и потом остается почти неизменной (II участка на рис. 1) или имеет незаметный линейный характер до поверхности [9].

В этом случае функциональная зависимость  $N_i = N_i(d)$  может быть представлена из двух аналитических выражений на интервале  $(0; d_k]$   $N_i = ae^{bd}$ , а на интервале  $d > d_k$  или  $(d_k; d]$  –  $N_i = N_{i0}$ , где  $N_{i0}$  определена по расчету из графика на основе экспериментальных данных (см. рис. 1):

образец 1:  $N_i = 113104e^{-0,088d}$  при температуре  $T_{\text{НК}} = 900$  °C (Sn-растворитель);

образец 2:  $N_i = 978734e^{-0,088d}$  при температуре  $T_{\text{НК}} = 1050$  °C (Sn-растворитель);

образец 3:  $N_i = 110353e^{-0,039d}$  при температуре  $T_{\text{НК}} = 800$  °C (Ga-растворитель);

образец 4:  $N_i = 135932e^{-0,023d}$  при температуре  $T_{\text{НК}} = 1050$  °C (Ga-растворитель).

На основе результатов рентгеновского микрозондового анализа был определен профиль распределения компонентов по глубине эпитаксиального слоя. Из рис. 2 видно, что на подложке кремния сначала выращиваются эпитаксиальные слои Si и вдоль направления роста его содержание плавно уменьшается, соответственно содержание германия увеличивается (это способствует ограниченности объема раствора-расплава) до поверхности пленок, образуя твердый раствор  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  в зависимости от режима роста.

Изменяя температуру начала ( $T_{\text{НК}}$ ) и прекращения ( $T_{\text{ПК}}$ ) кристаллизации выращиваемого твердого раствора, получаем пленки  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  разной толщины, которые имеют разную степень варизонности (см. рис. 2).

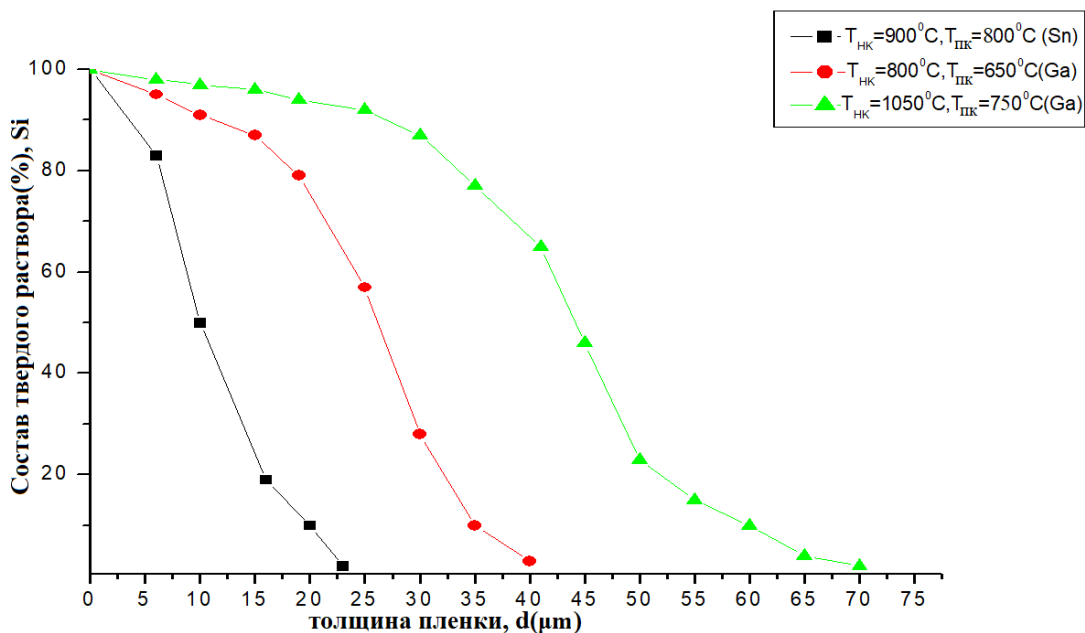


Рис. 2. Зависимость состава твердого раствора  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  от толщины ( $d$ ) пленок, выращенных из галлиевого и оловянного раствора-расплава при разных температурах начала ( $T_{\text{НК}}$ ) и прекращения ( $T_{\text{ПК}}$ ) кристаллизации  
 Fig. 2. Dependence of the composition of the  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  solid solution on the thickness ( $d$ ) of films grown from gallium and tin solution-melt at different temperatures of the beginning ( $T_{\text{bc}}$ ) and termination ( $T_{\text{tc}}$ ) of crystallization

В нашем варизонном  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  твердом растворе состав пленок изменился по толщине, поэтому мы можем считать  $d_i$  зависимой функцией от  $x$ ,  $d_i = f(x)$  (см. рис. 2). Тогда зависимость дислокаций  $N_i$  от состава  $x$  имеет следующий вид, как сложная функция:  $N_i = ae^{bf(x)}$ .

Для конкретного образца  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  в этом случае полуэмпирическая формула выражается как

$$N_i = 113104e^{-0,088(-0,0674x^2 - 0,0857x + 100,09)}.$$

С помощью этой формулы можно определить зависимость плотности дислокаций пленки от состава с точностью 9,8 %.

После этих экспериментов изучена функция  $d_i = f(x)$ , т. е. зависимость содержания компонентов твердого раствора от толщины пленок. Эксперимент показал, что, когда  $d < 20$  мкм, уравнение имеет почти линейный характер, с увеличением толщины ( $d$ ) пленок от 20 мкм проявляет квадратичный характер зависимости. Это показывает, что с увеличением температуры начала кристаллизации ( $T_{\text{НК}}$ ) твердого раствора из-за большой растворимости компонентов Si и Ge в растворителе в начальной стадии выращивания содержание Si вдоль направления роста медленно уменьшается, соответственно содержание Ge медленно увеличивается, чем при наименьшей  $T_{\text{НК}}$ . При росте в качестве подложек были использованы монокристаллические Si(111). Рост осуществляется из ограниченного раствора-расплава (здесь зазор между подложками, в котором располагается раствор-расплав, оставили в неизменном положении  $\delta = 1$  мм), поэтому состав твердого раствора  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  изменяется вдоль направления роста и является варизонным.

Значение постоянной кристаллической решетки полупроводникового твердого раствора  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  ( $a_{\text{Si}_{1-x}}$ ,  $a_{\text{Si}}$ ,  $a_{\text{Ge}}$  – параметры решетки твердого раствора, кремния и германия соответственно) может изменяться плавно в определенном интервале значений в зависимости от состава и подчиняется закону Вегарда, который может быть представлен в первом приближении в виде линейной интерполяции:

$$a_{\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x} = xa_{\text{Si}} + (1-x)a_{\text{Ge}}.$$

Благодаря этому имеем возможность избежать резкого несоответствия параметра решетки на структуре «подложка – пленка» во время роста эпитаксиальных слоев на подложке.

Эксперименты и полуэмпирические теоретические расчеты показали, что при росте эпитаксиальных слоев на подложке кремния доминирующим фактором является температура начала кристаллизации ( $T_{\text{НК}}$ ).

С повышением температуры начала кристаллизации ( $T_{\text{НК}}$ ) увеличивается концентрация плотности дислокаций в эпитаксиальных слоях твердого раствора. Из графика видно, что наклон при разных температурах  $T_{\text{НК}}$  почти одинаковый, т. е. в закономерной зависимости  $N_d$  от  $T_{\text{НК}}$ .

Эксперименты проводились в разных растворителях с целью уменьшить  $T_{\text{НК}}$ . Оптимальный режим с малыми дислокациями ( $9 \cdot 10^4 - 10^5 \text{ см}^{-2}$ ), удовлетворяющими требованиям приборостроения, получен на границе «подложка – ленка» при режиме  $T_{\text{НК}} = 900$  °С из оловянного, при режиме  $T_{\text{НК}} = 800$  °С из галлиевого растворов-расплавов, принудительным охлаждением, в зазоре между подложками 0,5–1,5 мм, на подложках Si с ориентациями  $\langle 111 \rangle$ .

Эти экспериментальные данные можно применять при получении твердых растворов  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  на подложке кремния с наименьшими плотностями и дислокациями с заданными электрофизическими параметрами при изготовлении приборов на их основе.

### Список литературы

1. Elham M. T., Fadaly, Alain Dijkstra, Jens Renè Suckert, Dorian Ziss, Marvin A. J. van Tilburg, Chenyang Mao, Yizhen Ren, Victor T. van Lange, Ksenia Korzun, Sebastian

- Kölling, Marcel A. Verheijen, David Busse, Claudia Rödl, Jürgen Furthmüller, Friedhelm Bechstedt, Julian Stangl, Jonathan J. Finley, Silvana Botti, Jos E. M. Haverkort & Erik P. A. M. Bakkers. Direct-bandgap emission from hexagonal Ge and SiGe alloys. *Nature*, 2020, no. 580, p. 205–209.
2. Kwang-Won Jo, Wu-Kang Kim, Mitsuru Takenaka, and Shinichi Takagi. Impact of SiGe layer thickness in starting substrates on strained Ge-on-insulator pMOSFETs fabricated by Ge condensation method. *Appl. Phys. Lett.*, 2019, no. 114, p. 062101.
  3. Тимофеев В. А. Морфология и структура поверхности на начальных стадиях роста пленок GeSi и GeSiSn на Si(100): Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Новосибирск, 2014.
  4. Саидов А. С., Усманов Ш. Н., Каланов М. У., Курмантаев А. Н., Бахтибаев А. Н. Структурные и некоторые электрофизические свойства твердого раствора  $\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$  // Физика твердого тела. 2013. Т. 55, вып. 1. С. 36–43.
  5. Сапаев Б., Саидов А. С. Исследование некоторых свойств структур  $\text{Si} - \text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  ( $0 \leq x \leq 1$ ), выращенных из ограниченного оловянного раствора-расплава методом жидкофазной эпитаксии // Физика и техника полупроводников. 2005. Т. 39, вып. 10. С. 1183–1188.
  6. Саидов А. С., Усманов Ш. Н., Холиков К. Т., Сапаров Д. Получение и исследование непрерывного твердого раствора  $\text{Si} - (\text{Si}_2)_{1-x-e} (\text{Ge}_2)_x (\text{GaAs})_y$  // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33, вып. 16. С. 59–64.
  7. Андреев В. М., Долгинов Л. М., Третьяков Д. Н. Жидкостная эпитаксия в технологии полупроводниковых приборов. М.: Сов. радио, 1975.
  8. Саидов А. С., Саидов М. С., Кошчанов Э. А. Жидкостная эпитаксия компенсированных слоев арсенида галлия и твердых растворов на его основе: Монография. Ташкент: Фан, 1986. 128 с.
  9. Алфимова Д. Л., Лунин Л. С., Лунина М. Л., Арустамян Д. А., Казакова А. Е., Чеботарев С. Н. Выращивание и свойства изопараметрических гетероструктур InAlGaPAs / GaAs // Физика и техника полупроводников. 2017. Т. 51, вып. 10. С. 1426–1433.

### References

1. Elham M. T., Fadaly, Alain Dijkstra, Jens Renè Suckert, Dorian Ziss, Marvin A. J. van Tilburg, Chenyang Mao, Yizhen Ren, Victor T. van Lange, Ksenia Korzun, Sebastian Kölling, Marcel A. Verheijen, David Busse, Claudia Rödl, Jürgen Furthmüller, Friedhelm Bechstedt, Julian Stangl, Jonathan J. Finley, Silvana Botti, Jos E. M. Haverkort & Erik P. A. M. Bakkers. Direct-bandgap emission from hexagonal Ge and SiGe alloys. *Nature*, 2020, no. 580, p. 205–209.
2. Kwang-Won Jo, Wu-Kang Kim, Mitsuru Takenaka, and Shinichi Takagi. Impact of SiGe layer thickness in starting substrates on strained Ge-on-insulator pMOSFETs fabricated by Ge condensation method. *Appl. Phys. Lett.*, 2019, no. 114, p. 062101.
3. Timofeev V. A. Morphology and surface structure at the initial stages of growth GeSi and GeSiSn on Si (100): Dis. Cand. physical-mat. sciences. Novosibirsk, 2014. (in Russ.)
4. Saidov A. S., Usmanov Sh. N., Kalanov M. U., Kurmantayev A. N., Bakhtibaev A. N. Structural and some electrophysical properties of the  $\text{Si}_{1-x} - \text{Sn}_x$  solid solution. *Solid-solution physics*, 2013, vol. 55, no. 1, p. 36–43. (in Russ.)
5. Sapaev B., Saidov A. S. Investigation of some properties of  $\text{Si} - \text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  structures ( $0 \leq x \leq 1$ ) grown from a limited tin solution-melt by liquid phase epitaxy. *Physics and technology of semiconductors*, 2005, vol. 39, no. 10, p. 1183–1188. (in Russ.)
6. Saidov A. S., Usmanov Sh. N., Kholikov K. T., Saparov D. Obtaining and research continuous solid solution  $\text{Si} - (\text{Si}_2)_{1-x-e} (\text{Ge}_2)_x (\text{GaAs})_y$ . *Technical Physics Letters*, 2007, vol. 33, no. 16, p. 59–64. (in Russ.)

7. **Andreev V. M., Dolginov L. M., Tretyakov D. N.** Liquid epitaxy in technology semiconductor devices. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1975. (in Russ.)
8. **Saidov A. S., Saidov M. S., Koshchanov E. A.** Liquid epitaxy compensated layers of gallium arsenide and solid solutions based on it. Monograph. Tashkent, Science, 1986, 128 p. (in Russ.)
9. **Alfimova D. L., Lunin L. S., Lunina M. L., Arustamyan D. A., Kazakova A. E., Chebotarev S. N.** Growth and Properties of Isoparametric InAlGaPAs Heterostructures / Ga As. *Physics and technology of semiconductors*, 2017, vol. 51, iss. 10, p. 1426–1433. (in Russ.)

*Материал поступил в редколлегию*  
*Received*  
*20.05.2020*

### Сведения об авторах / Information about the Authors

**Саидов Амин Сафарбоевич**, доктор физико-математических наук, профессор Физико-технологического института им. С. В. Стародубцева АН РУз (Ташкент, Узбекистан)

**Amin S. Saidov**, Doctor of Science of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Physics and Technology Institute named after S. V. Starodubtsev AS RUz (Tashkent, Uzbekistan)

amin@uzsci.net

**Раззоков Алижон Шоназарович**, кандидат физико-математических наук, доцент Ургенчского государственного университета (Ургенч, Узбекистан)

**Alozhon Sh. Razzakov**, Candidate of Science of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at Urgench State University (Urgench, Uzbekistan)

razzokov.a@bk.ru