

ДИФФУЗИЯ Ag, Sn И Pb ПО АТОМАРНО-ЧИСТОЙ ПОВЕРХНОСТИ Ge(111)

А. Е. Долбак, Р. А. Жачук*

*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук
630090, Новосибирск, Россия*

Поступила в редакцию 4 марта 2019 г.,
после переработки 15 апреля 2019 г.
Принята к публикации 16 апреля 2019 г.

Методами электронной оже-спектроскопии и дифракции медленных электронов изучена диффузия Ag, Sn и Pb по поверхности Ge(111). Установлены механизмы диффузии атомов этих элементов по поверхности Ge(111) и измерены температурные зависимости коэффициентов диффузии. Проведено сравнение параметров диффузии этих элементов по поверхностям Ge(111) и Si(111).

DOI: 10.1134/S0044451019090098

а путем их диффузии через объем кремния с последующей сегрегацией на поверхность [8].

1. ВВЕДЕНИЕ

Диффузия адатомов по поверхностям полупроводников играет важную роль во многих процессах, протекающих на них. С практической точки зрения наибольший интерес представляет диффузия вдоль поверхностей кремния. Так, диффузия вдоль поверхности Si(111) достаточно хорошо изучена (см., например, [1–8]). Существует несколько механизмов переноса атомов вдоль поверхности. Так, перенос атомов Ge вдоль поверхности Si(111) происходит непосредственно по поверхности кремния по механизму случайного блуждания [4]. Если же коэффициенты диффузии атомов вещества по чистой поверхности много меньше, чем по формируемой этими атомами поверхностной фазе, то перенос вещества осуществляется по механизму твердофазного растекания. В этом случае атомы, составляющие поверхностную фазу, неподвижны. Диффундирующие по поверхностной фазе атомы при достижении фронта распределения попадают на чистую поверхность и образуют поверхностную фазу, тем самым способствуя движению фронта распределения. По такому механизму протекает диффузия Ag, Sn и Pb по поверхности Si(111) [3, 5, 7]. Перенос же атомов Cu происходит не по поверхности кремния,

В отличие от диффузии по поверхности Si(111), диффузия по поверхности Ge(111) изучена значительно меньше. Так, в работах [9,10] было установлено, что коэффициенты диффузии Sb и In на поверхности Ge(111) уменьшаются с ростом концентрации этих веществ. В работе [11] исследовалась диффузия Ag на поверхностях Ge(111) с различной плотностью ступеней. Были установлены зависимости коэффициента диффузии Ag, а также энергии активации и предэкспоненциального множителя от концентрации Ag на поверхности Ge(111) и отклоненных от нее поверхностях. Обнаружен максимум величины коэффициента диффузии при покрытии Ag, близком к величине, при которой формируется структура Ge(111)-4 × 2-Ag. Максимум на зависимостях энергии активации и предэкспоненциального множителя наблюдается при той же концентрации Ag. Все зависимости получены до концентраций 0.5–0.6 МС (МС — монослой, для Ge(111) 1 МС равен $7.21 \cdot 10^{14}$ ат/см²). Авторы [12,13] исследовали уширение островков Ag при отжиге в диапазоне температур 200–500 °С. В процессе отжига уширение островков сначала происходило за счет распространения структуры $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag, а затем за счет распространения структуры 4 × 4-Ag. На основе полученных данных о распространении фронтов этих структур были рассчитаны соответствующие этим процессам коэффициенты диффузии и энергии активации — 0.78 и 0.87 эВ. В рабо-

* E-mail: dolbak@isp.nsc.ru

те [14] с помощью сканирующего туннельного микроскопа авторы исследовали перемещение отдельных атомов Pb по чистой поверхности Ge(111). В диапазоне температур 24–79 °C была получена температурная зависимость коэффициентов диффузии, которая описывается выражением $D = 1 \cdot 10^{-9} \exp(-0.54 \text{ эВ}/kT) \text{ см}^2/\text{с}$. Концентрация атомов на поверхности была 0.05 МС. В работе [15] с помощью метода функционала плотности рассчитаны энергии активации диффузии и арениусовский предэкспоненциальный фактор для отдельных атомов Pb и Sn на поверхности Ge(111) со структурой $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$, сформированной под воздействием этих же элементов. Концентрация атомов в этих структурах 0.33 МС. Показано, что значение активационного барьера составляет 0.33 и 0.25 эВ (соответственно для Pb и Sn) и зависит от энергий образования адатома и атомного радиуса диффундирующего металла.

Атомарно-чистые поверхности Si(111) и Ge(111) имеют разную структуру — 7×7 и $C(2 \times 8)$, тогда как объемная кристаллическая структура у них одинаковая — структура алмаза. Адсорбция атомов серебра, олова и свинца на эти поверхности приводит к формированию различных поверхностных фаз, которые могут оказывать существенное влияние на поверхностную диффузию [1, 3, 5, 7]. Структуры $3 \times 1\text{-Ag}$, $\sqrt{3} \times \sqrt{3}\text{-Ag}$ [16, 17] наблюдаются как на поверхности Si(111), так и на Ge(111), тогда как $6 \times 1\text{-Ag}$, $C(12 \times 2)\text{-Ag}$ [18] — только на Si(111), а $4 \times 4\text{-Ag}$ [17], $5 \times 1\text{-Ag}$ [19], $12\sqrt{3} \times 12\sqrt{3}\text{-Ag}$ [20], $6 \times 6\text{-Ag}$, $\sqrt{39} \times \sqrt{39}\text{-Ag}$ [21] — на Ge(111). Структура $6 \times 1\text{-Ag}$ на поверхности кремния при температуре 230 °C перестраивается в $3 \times 1\text{-Ag}$, а при -170 °C — в $C(12 \times 2)\text{-Ag}$ [22]. На поверхности германия подобные переходы не наблюдались. Рост серебра на поверхностях Si(111) и Ge(111) происходит по механизму Странского–Крастанова, при котором сначала формируется структура $\sqrt{3} \times \sqrt{3}\text{-Ag}$, а затем островки серебра [23, 24]. В поведении олова и свинца при адсорбции на эти поверхности также наблюдаются как сходства, так и различия. Так, структуры $\sqrt{3} \times \sqrt{3}\text{-Sn}$ и $\sqrt{3} \times \sqrt{3}\text{-Pb}$ формируются как на Si(111), так и на Ge(111). Структуры $\alpha\text{-}\sqrt{3} \times \sqrt{3}\text{-Sn}$ на обеих поверхностях при температуре -160 °C перестраиваются в $3 \times 3\text{-Sn}$ [25, 26]. Структура Si(111)-НИС-Pb (hexagonal incommensurate, НИС-структура, состоящая из доменов структуры $\sqrt{3} \times \sqrt{3}\text{-Pb}$, разделенных между собой доменными стенками [27]) при температуре -20 °C перестраивается в $\sqrt{7} \times \sqrt{3}\text{-Pb}$, а при -140 °C — в $\sqrt{43} \times \sqrt{3}\text{-Pb}$ [28]. В то же время на

поверхности Ge(111) структура $\alpha\text{-}\sqrt{3} \times \sqrt{3}\text{-Pb}$ при температуре -20 °C перестраивается в $3 \times 3\text{-Pb}$ [29].

Целью настоящей работы было установление механизмов диффузии массопереноса атомов Ag, Sn и Pb по атомарно-чистой поверхности Ge(111), построение температурных зависимостей коэффициентов диффузии и сравнение параметров диффузии этих элементов на поверхностях Ge(111) и Si(111).

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты проводились на установке LAS-2000 (Riber) на образцах германия (111) *p*-типа с сопротивлением около 5 Ом·см и размерами $22 \times 5 \times 0.3$ мм³. Для получения атомарно-чистой поверхности со структурой $C(2 \times 8)$ (рис. 1а) проводилась ее очистка посредством нескольких циклов травления поверхности ионами Ag с энергией 750 эВ и отжига образцов при температуре 740 °C. Нагрев образцов осуществлялся пропусканием переменного тока. Температура образца измерялась с помощью оптического пирометра. В диапазоне температур от 150 °C до 300 °C температуру определяли с помощью термопары. Структура поверхности контролировалась методом дифракции медленных электронов (ДМЭ), а состав поверхности — с помощью электронной оже-спектроскопии (ЭОС). Использовались пики Ag (351 эВ), Sn (430 эВ), Pb (94 эВ) и Ge (1147 эВ) (рис. 2). Диаметр пучка электронов в оже-спектрометре составлял примерно 15 мкм, энергия первичных электронов составляла 3 кэВ. Диаметр первичного пучка в системе ДМЭ имел величину около 0.8 мм. Чувствительность ЭОС была не менее 2 ат. % по Ge, 0.1 ат. % по Ag, 0.2 ат. % по Sn и 0.3 ат. % по Pb.

Концентрации рассчитывались исходя из модели однородного распределения элементов с использованием коэффициентов элементной чувствительности, взятых из справочника [30]. При расчете концентрации Pb с использованием пика Pb (94 эВ) учитывалось близкое расположение пика Ge (89 эВ). Для этого на чистой поверхности Ge(111) записывались пик Ge (1147 эВ) и оже-сигнал в том диапазоне энергий, в котором записывался пик Pb (94 эВ). Интенсивность полученного сигнала учитывалась при расчете концентрации Pb в каждой точке распределения $C_{\text{Pb}}(x)$ пропорционально интенсивности пика Ge (1147 эВ) в каждой точке диффузионного распределения.

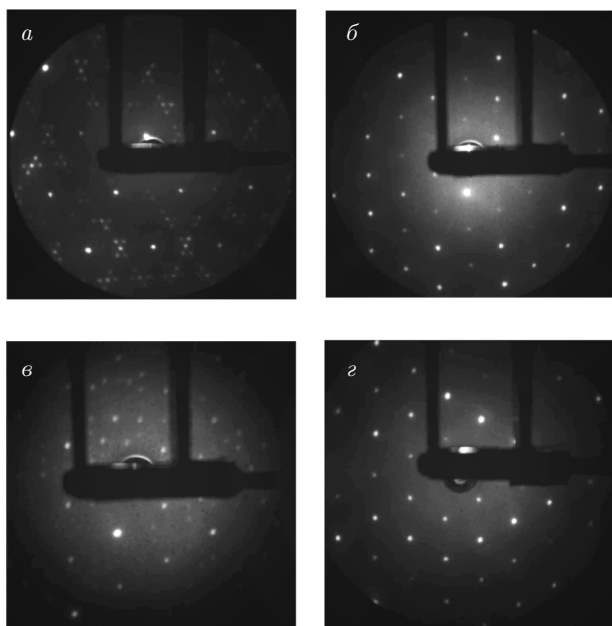


Рис. 1. Картины ДМЭ от поверхностных структур, полученных на поверхности Ge(111): а) $C(2 \times 8)$, 90 эВ; б) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag, 94 эВ; в) $3 \times 2\sqrt{3}$ -Sn, 72 эВ; г) $\beta\text{-}\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Pb, 90 эВ

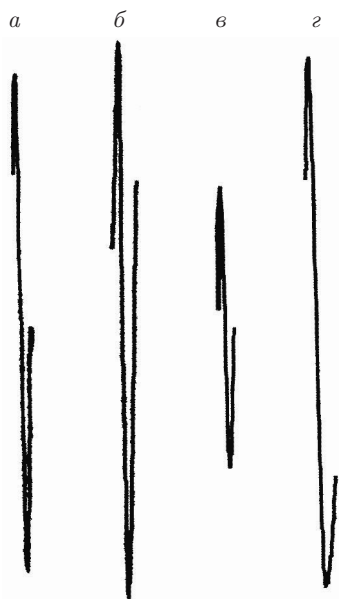


Рис. 2. Пики Ag (351 эВ) (а), Sn (430 эВ) (б), Pb (94 эВ) (в) и Ge (1147 эВ) (г), измеренные на поверхности Ge(111) после формирования диффузионных распределений $C_{Ag}(x)$, $C_{Sn}(x)$ и $C_{Pb}(x)$ соответственно и полученные при одинаковой чувствительности. Пики Ag (351 эВ) (а) и Ge (1147 эВ) (г) измерены в одной точке поверхности

Источником атомов металлов при исследовании диффузии на поверхности германия служила полоска толщиной приблизительно 10 мС с резкой границей, осажденная на чистую поверхность образца. Ширина полоски была примерно 4 мм. Край полоски был перпендикулярен длинной стороне образца. Полоска формировалась с помощью коллиматора. Размытие края полоски, связанное с геометрией расположения источника, коллиматора и образца, составляло не более 20 мкм. Скорость осаждения металлов была около 0.1 мС/мин при давлении $(2-4) \cdot 10^{-8}$ Па. Концентрация примесей в осаждаемых металлах не превышала 10^{-2} ат. %.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Диффузия серебра по поверхности Ge(111)

На поверхности Ge(111) после отжига в диапазоне температур 400–475 °С наблюдались концентрационные распределения $C_{Ag}(x, t)$, где x — расстояние от источника атомов серебра, t — время отжига. Типичное концентрационное распределение представлено на рис. 3. На поверхности, занятой распределением, наблюдается структура $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag (рис. 1б). Форма получаемых распре-

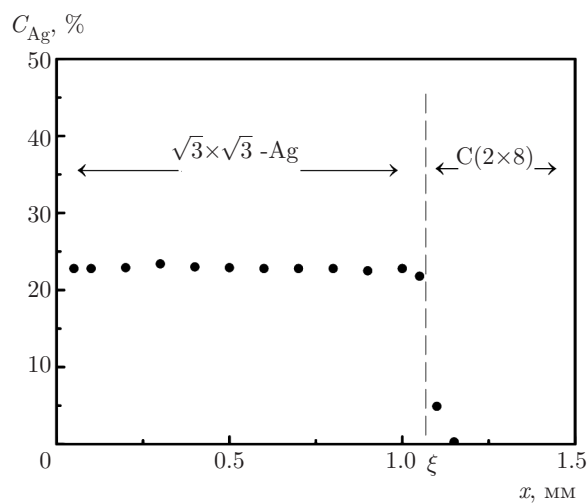


Рис. 3. Концентрационное распределение $C_{Ag}(x)$ на поверхности Ge(111) после отжига при температуре 475 °С в течение 90 мин и соответствующая зависимость структуры поверхности Ge(111) от концентрации серебра. Штриховой линией показан фронт концентрационного распределения, сдвигающийся слева направо при отжиге. Граница осажденной полоски Ag, служащей источником диффундирующих атомов, находится при $x = 0$ мм

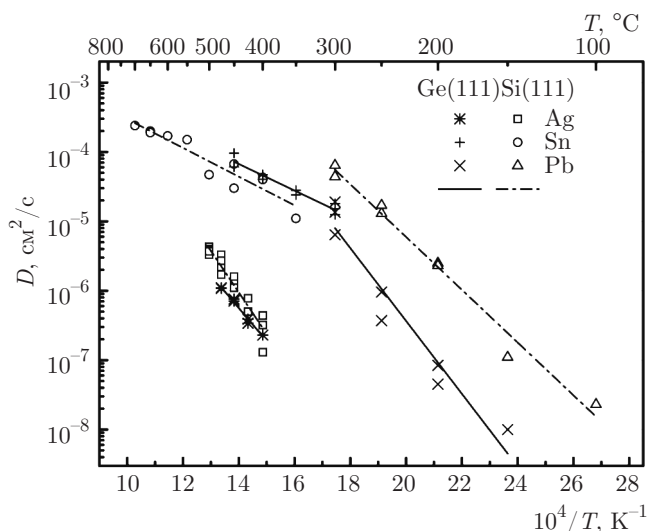


Рис. 4. Зависимости коэффициентов диффузии Ag, Sn и Pb на поверхностях Ge(111) и Si(111) от температуры

делений (рис. 3) соответствует диффузии серебра по механизму твердофазного растекания. Изменения концентрации серебра на диффузионном распределении настолько малы, что их не удастся надежно зарегистрировать с помощью ЭОС и, следовательно, C_{Ag} остается практически постоянной вплоть до фронта поверхностной фазы $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag. В этом случае расчет коэффициентов диффузии атомов серебра по поверхностной фазе $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag с учетом формы профиля диффузионного распределения невозможен и для оценки коэффициентов диффузии использовалось выражение

$$D = \xi^2/2t. \quad (1)$$

Здесь ξ — положение фронта распределения, а D — коэффициент диффузии атомов Ag по поверхностной фазе Ge(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag. Температурная зависимость коэффициентов диффузии, полученных с помощью уравнения (1), представлена на рис. 4 и описывается выражением

$$D_{Ag/Ge(111)} = 2.2 \exp(-0.9 \text{ эВ}/kT) \text{ см}^2/\text{с}.$$

Отток атомов серебра с поверхности в объем германия во время отжига не оказывает заметного влияния на вид концентрационных распределений $C_{Ag}(x, t)$, так как растворимость его в германии в исследуемом диапазоне температур мала [31].

Формирование резкого фронта распределения говорит не только о том, что коэффициент диффузии атомов Ag по чистой поверхности Ge(111) много меньше коэффициента диффузии этих атомов по

структуре $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag, но и о том, что при концентрациях серебра менее 0.8 МС (концентрация, при которой формируется структура $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag [32]) коэффициенты диффузии также много меньше. В работе [11] коэффициенты диффузии серебра по поверхности Ge(111) получены для концентраций, не превышающих величину 0.5–0.6 МС, при этом максимума они достигают при 0.25 МС, когда формируется структура 4×2 -Ag. Приведенные в работе [11] коэффициенты диффузии более чем на порядок меньше соответствующих величин, полученных нами. Коэффициенты диффузии и энергии активации процесса уширения островков серебра, полученные из наблюдений за распространением структуры $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag в работах [12, 13], близки к нашим результатам. Коэффициенты диффузии отличаются от данных, полученных нами, менее чем на порядок, а энергия активации составляет 0.78 эВ. Близость результатов связана с тем, что, измеряя распространение фронта структуры $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag, авторы работ [12, 13] получали длины диффузионных распределений $C_{Ag}(x, t)$, близкие к полученным в настоящей работе.

Таким образом, диффузия серебра по поверхностям Si(111) [3] и Ge(111) протекает по механизму твердофазного растекания. Форма распределений $C_{Ag}(x, t)$ на поверхностях Si(111) и Ge(111) сходна, при этом поверхностные фазы, по которым диффундируют атомы серебра, одинаковы — $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag. Коэффициенты диффузии рассчитывались с помощью выражения (1). Температурная зависимость коэффициентов диффузии серебра по поверхности Si(111) описывается выражением

$$D_{Ag/Si(111)} = 2.8 \cdot 10^2 \exp(-1.2 \text{ эВ}/kT) \text{ см}^2/\text{с}.$$

На рис. 4 показаны зависимости коэффициентов диффузии серебра по поверхностям Si(111) и Ge(111) от температуры. Температурные зависимости расположены близко и величины коэффициентов диффузии в диапазоне температур 400–475 °С различаются менее чем в два раза.

3.2. Диффузия олова по поверхности Ge(111)

Концентрационные распределения $C_{Sn}(x, t)$ на поверхности Ge(111) были получены в диапазоне температур 300–450 °С. Форма распределений подобна той, которая представлена на рис. 3, и соответствует диффузии по механизму твердофазного растекания. На поверхности, занятой распределением, наблюдается структура $3 \times 2\sqrt{3}$ -Sn (рис. 1б).

Коэффициенты диффузии рассчитывались с помощью выражения (1). Полученные таким образом коэффициенты диффузии не зависели от времени отжига при одной и той же температуре. Это свидетельствует о том, что источник атомов олова является источником постоянной мощности, а диффузия в объеме германия и десорбция атомов олова с поверхности не оказывают заметного влияния на концентрационные распределения в рассматриваемом диапазоне температур. Температурная зависимость коэффициентов диффузии представлена на рис. 4 и описывается выражением

$$D_{\text{Sn/Ge}(111)} = 5 \cdot 10^{-2} \exp(-0.4 \text{ эВ}/kT) \text{ см}^2/\text{с}.$$

Таким образом, диффузия олова как по поверхности Si(111) [7], так и по Ge(111) происходит по механизму твердофазного растекания. При этом структуры, формирующиеся на поверхностях кремния и германия, разные: Si(111)- $2\sqrt{3} \times 2\sqrt{3}$ -Sn и Ge(111)- $3 \times 2\sqrt{3}$ -Sn. Температурная зависимость коэффициента диффузии олова по поверхности Si(111) описывается выражением

$$D_{\text{Sn/Si}(111)} = 3 \cdot 10^{-2} \exp(-0.4 \text{ эВ}/kT) \text{ см}^2/\text{с}.$$

Зависимость рассчитана с помощью выражения (1) и представлена на рис. 4. Зависимости для поверхностей Si(111) и Ge(111) практически совпадают. Поверхностные фазы Si(111)- $2\sqrt{3} \times 2\sqrt{3}$ -Sn и Ge(111)- $3 \times 2\sqrt{3}$ -Sn при температуре около 200 °С обратимо перестраиваются с образованием поверхностных фаз 1×1 -Sn [33]. Таким образом, диффузия атомов олова на поверхностях кремния и германия при температурах выше 200 °С происходит не по поверхностным фазам Si(111)- $2\sqrt{3} \times 2\sqrt{3}$ -Sn и Ge(111)- $3 \times 2\sqrt{3}$ -Sn, а по фазам 1×1 -Sn. Можно предположить, что свойства поверхностных фаз Si(111)- 1×1 -Sn и Ge(111)- 1×1 -Sn близки [34,35], что и приводит к практически одинаковым коэффициентам и энергиям активации диффузии (рис. 4).

3.3. Диффузия свинца по поверхности Ge(111)

В результате отжига в диапазоне температур 150–300 °С формируются концентрационные распределения $C_{\text{Pb}}(x, t)$. Форма распределений аналогична той, которая представлена на рис. 3. Диффузия свинца происходит по механизму твердофазного растекания. При комнатной температуре на поверхности, занятой распределением, наблюдается структура $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Pb (рис. 1з). Прогрев при темпера-

туре около 300 °С приводит к обратимому фазовому переходу, при котором дробные рефлексы на дифракционных картинах исчезают и остаются только целые рефлексы от структуры 1×1 -Pb. Такой фазовый переход наблюдается только для структуры β - $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Pb [36], и поэтому наблюдаемая нами структура — это β - $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Pb.

Расчет коэффициентов диффузии осуществлялся с помощью выражения (1). Полученные в результате расчетов коэффициенты диффузии не зависели от времени отжига при одной и той же температуре. Это свидетельствует о том, что источник атомов свинца является источником постоянной мощности, а диффузия в объеме германия и десорбция атомов свинца с поверхности не оказывают заметного влияния на концентрационные распределения. Температурная зависимость коэффициентов диффузии представлена на рис. 4 и описывается выражением

$$D_{\text{Pb/Ge}(111)} = 5.3 \cdot 10^3 \exp(-1.0 \text{ эВ}/kT) \text{ см}^2/\text{с}.$$

Экстраполируя зависимость

$$D = 1 \cdot 10^{-9} \exp(-0.54 \text{ эВ}/kT) \text{ см}^2/\text{с}$$

из работы [14] до температур 150–300 °С, получаем, что в этом диапазоне температур коэффициенты диффузии свинца по чистой поверхности Ge(111) имеют величины порядка 10^{-16} – 10^{-14} см²/с. Эти значения примерно на восемь порядков меньше коэффициентов диффузии по поверхностной структуре β - $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Pb, полученных нами. Такие отличия соответствуют наблюдаемой диффузии по механизму твердофазного растекания, при котором $D_{\beta\text{-}\sqrt{3} \times \sqrt{3}\text{-Pb}} \gg D_{c(2 \times 8)}$. Величина энергии активации диффузии атомов свинца по поверхности со структурой $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Pb, полученная в работе [15], в три раза меньше величины, полученной нами. Нужно заметить, однако, что структура $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Pb (обозначаемая также как α - $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Pb) формируется при 0.33 МС свинца. Для образования же структуры β - $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Pb, наблюдаемой на наших диффузионных распределениях, необходимо в четыре раза больше атомов свинца. Известно, что атомные структуры поверхностных фаз α - и β - $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Pb значительно различаются [37], и это, по-видимому, приводит к различиям в энергии активации диффузии.

Механизм диффузии свинца по поверхностям Si(111) [5] и Ge(111) — твердофазное растекание. В первом случае на распределении формируется НПС-структура, состоящая из доменов структуры $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Pb, разделенных между собой доменны-

ми стенками [27], а во втором случае — структура $\beta\text{-}\sqrt{3} \times \sqrt{3}\text{-Pb}$. Коэффициенты диффузии атомов свинца по поверхностной фазе Si(111)-НПС-Pb рассчитаны с помощью выражения (1). Температурная зависимость коэффициентов диффузии свинца на поверхности Si(111) описывается выражением

$$D_{\text{Pb/Si(111)}} = 800 \exp(-0.8 \text{ эВ}/kT) \text{ см}^2/\text{с}$$

и представлена на рис. 4. Коэффициенты диффузии свинца по поверхности Si(111) на 1–2 порядка больше, чем на Ge(111), в диапазоне температур 150–300 °С. Энергии активации также различаются. Это, по-видимому, связано с различиями в строении структур Si(111)-НПС-Pb и Ge(111)- $\beta\text{-}\sqrt{3} \times \sqrt{3}\text{-Pb}$ [38, 39].

Для всех трех элементов (Ag, Sn, Pb) при прогреве образца постоянным током наблюдается электромиграция атомов к отрицательному электроду. Таким образом, атомы этих элементов обладают положительным эффективным зарядом. В том случае, когда направление протекания постоянного тока совпадает с направлением движения диффузионного фронта, длина получаемых распределений $C_{\text{Me}}(x)$ возрастает по сравнению с тем, что наблюдается в случае прогрева образца переменным током. Форма распределения при этом не меняется. Если направление протекания постоянного тока противоположно направлению движения диффузионного фронта, то длина распределений $C_{\text{Me}}(x)$ остается неизменной и не зависит от времени отжига.

4. ВЫВОДЫ

Установлены механизмы диффузии атомов серебра, олова и свинца по поверхности Ge(111) и получены температурные зависимости коэффициентов диффузии атомов этих элементов. Показано, что диффузия атомов серебра, олова и свинца по поверхности Ge(111) протекает по механизму твердофазного растекания с формированием поверхностных фаз $\sqrt{3} \times \sqrt{3}\text{-Ag}$, $1 \times 1\text{-Sn}$ и $\sqrt{3} \times \sqrt{3}\text{-Pb}$ соответственно. Таким образом, механизмы диффузии атомов Ag, Sn и Pb и формируемые ими на диффузионных распределениях поверхностные фазы совпадают для поверхностей Ge(111) и Si(111).

Найдено, что величины коэффициентов диффузии атомов серебра, олова и свинца на поверхностях Si(111) и Ge(111) в рассматриваемых диапазонах температур близки, при этом наибольшее их различие наблюдается для атомов свинца. Большое сходство результатов исследования диффузии атомов

Ag, Sn, Pb на поверхностях Si(111) и Ge(111), по-видимому, связано со сходными химическими свойствами кремния и германия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. Л. Гаврилюк, В. Г. Лифшиц, *Поверхность* **4**, 82 (1983).
2. P. Sobotik, I. Ostadal, P. Kocan et al., *Czechoslovak J. Phys.* **53**, 69 (2003).
3. А. Е. Долбак, Б. З. Ольшанецкий, *ЖЭТФ* **143**, 1105 (2013).
4. А. Е. Dolbak and B. Z. Olshanetsky, *Central Eur. J. Phys.* **4**, 310 (2006).
5. А. Е. Dolbak, R. A. Zhachuk, and B. Z. Olshanetsky, *Central Eur. J. Phys.* **2**, 254 (2004).
6. I. Brihuega, M. M. Ugeda, and J. M. Gomez-Rodriguez, *Phys. Rev. B* **76**, 035422 (2007).
7. А. Е. Долбак, Б. З. Ольшанецкий, *ФТТ* **52**, 1215 (2010).
8. А. Е. Dolbak, R. A. Zhachuk, and B. Z. Olshanetsky, *Central Eur. J. Phys.* **3**, 263 (2003).
9. K. A. Schultz and E. G. Seebauer, *J. Chem. Phys.* **97**, 6958 (1992).
10. I. I. Suni and E. G. Seebauer, *J. Chem. Phys.* **100**, 6772 (1994).
11. E. Sulida and M. Henzler, *J. Phys. C* **16**, 1543 (1983).
12. J. A. Venables, R. Persaud, F. L. Metcalfe et al., *J. Phys. Chem. Sol.* **55**, 955 (1994).
13. F. L. Metcalfe and J. A. Venables, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* **280**, 55 (1992).
14. E. Ganz, S. K. Theiss, I.-S. Hwang et al., *Phys. Rev. Lett.* **68**, 1567 (1992).
15. Y. Luniakov, *Sol. St. Phenom.* **213**, 12 (2014).
16. R. J. Wilson and S. Chiang, *Phys. Rev. Lett.* **58**, 369 (1987).
17. D. Grozea, E. Bengu, C. Collazo-Davilla et al., *Surf. Rev. Lett.* **6**, 1061 (1999).
18. Feng-Chuan Chuang, Chia-Hsiu Hsu, Cai-Zhuang Wang et al., *Phys. Rev. B* **78**, 245418 (2008).
19. D. J. Spence and S. P. Tear, *Surf. Sci.* **398**, 91 (1998).
20. M. Padovani, E. Magnano, G. Bertoni et al., *Appl. Surf. Sci.* **212–213**, 213 (2003).

21. H. M. Zhang and R. I. G. Uhrberg, *Appl. Surf. Sci.* **212-213**, 353 (2003).
22. K. Sakamoto, H. Ashima, H. M. Zhang et al., *Phys. Rev. B* **65**, 045305 (2001).
23. Y. Borensztein, R. Alameh, T. Lopez-Rios et al., *Vacuum* **41**, 684 (1990).
24. F. L. Metcalfe and J. A. Venables, *Surf. Sci.* **369**, 99 (1996).
25. L. Ottaviano, M. Crivellari, L. Lozzi et al., *Surf. Sci.* **445**, L41 (2000).
26. A. Goldoni and S. Modesti, *Phys. Rev. Lett.* **79**, 3266 (1997).
27. S. Stepanovsky, M. Yakes, V. Yeh et al., *Surf. Sci.* **600**, 1417 (2006).
28. K. Horikoshi, X. Tong, T. Nagao et al., *Phys. Rev. B* **60**, 13287 (1999).
29. J. M. Carpinelli, H. H. Weitering, E. W. Plummer et al., *Nature* **381**, 398 (1996).
30. P. W. Palmberg, G. E. Riach, R. E. Weber et al., *Handbook of Auger Electron Spectroscopy*, Phys. Elek. Ind. Inc., Minnesota (1976).
31. H. Bracht, N. A. Stolwijk, and H. Mehrer, *Phys. Rev. B* **43**, 14465 (1991).
32. D. Grozea, E. Bengu, and L. D. Marks, *Surf. Sci.* **461**, 23 (2000).
33. T. Ichikawa, *Surf. Sci.* **140**, 37 (1984).
34. M. F. Reedijk, J. Arsic, F. K. de Theije et al., *Phys. Rev. B* **64**, 033403 (2001).
35. P. E. J. Eriksson, J. R. Osiecki, K. Sakamoto et al., *Phys. Rev. B* **81**, 235410 (2010).
36. Y. Sato, S. Chiang, and N. C. Bartelt, *Phys. Rev. Lett.* **99**, 096103 (2007).
37. Y. Ohtsubo, H. Muto, K. Yaji et al., *J. Phys.: Condens. Matter* **23**, 435001 (2011).
38. M. Hupalo, T. L. Chan, C. Z. Wang et al., *Phys. Rev. B* **66**, 161410 (2002).
39. S. A. de Vries, P. Goettkindt, P. Steadman et al., *Phys. Rev. B* **59**, 13301 (1999).