

Самоорганізація атомів в розплавах германію та кремнію

Є.Я. Швець, І.Ф. Червоний, О.К. Головка*

Запорізька державна інженерна академія, пр. Леніна, 226, 69006 Запоріжжя, Україна

(Одержано 06.10.2015; опубліковано online 24.12.2015)

Обґрунтована схильність атомів германію й кремнію до самоорганізації в розплавах з утворенням мікрокластерів у формі ланцюжків з ковалентними міжатомними зв'язками. Розроблена модель розподілу мікрокластерів за розмірами. За моделлю оцінена кількість атомів в мікрокластері залежно від температури. При температурі плавлення в розплаві германію середня кількість атомів у ланцюжку $Aver = 2,60$, а максимально ймовірна їхня кількість ≈ 1 . Відповідно, в розплаві кремнію $Aver = 2,77$, максимально ймовірна кількість атомів ≈ 2 . При температурі кипіння в обох розплавах максимальна щільність ймовірностей відповідає поодиноким атомам. Результати оцінок добре узгоджуються з експериментальними даними з літератури. Робота переслідує мету поглиблення уявлень про процеси самоорганізації та структурної перебудови в розплавах елементарних напівпровідників, що впливають на механізм процесу кристалізації.

Ключові слова: Мікро- та наноелектроніка, Германій, Кремній, Розплав, Мікрокластер, Атомний ланцюжок, Щільність ймовірностей.

PACS numbers: 61.20.Gy, 81.07.Bc

1. ВСТУП

Самоорганізація атомів германію вивчалася при формуванні наноострівців в процесі молекулярно-променевої епітаксії германію на кремнієву підкладку [1]. Самоорганізація атомів кремнію з утворенням молекул в формі димерів, тримерів, гексамерних кілець, а також більших агрегатів спостерігалася при відпалах аморфних шарів SiO_2 , в які попередньо були імплантовані іони Si^+ [2]. Самоорганізація атомів в розплавах цих напівпровідників вивчена значно менше. Однак кристалізація напівпровідників з рідкої фази широко використовується при вирощуванні монокристалів та епітаксійних плівок для мікро- й оптоелектроніки. Рідка фаза утворюється і бере участь у кристалізації в деяких випадках при виготовленні наноструктур за методами газозфазної або електронно-променевої епітаксії (механізм «пара – рідина – кристал») [3]. За десятки років розвитку напівпровідникових технологій накопичений великий обсяг експериментальних даних та теоретичних розробок щодо структури та фізичних процесів в кристалах напівпровідників, особливо кремнію. Структура їхніх розплавів, а також фізичні процеси, що відбуваються в них на атомно-молекулярному рівні, вивчені значно менше.

Відомо [4], що речовина в рідкому стані є важким об'єктом для встановлення не тільки кількісних, але й навіть якісних фізичних закономірностей. Поглиблення уявлень про характер міжатомної взаємодії, процеси самоорганізації часток та структурної перебудови в розплавах германію й кремнію є актуальними для більш ефективного управління процесами вирощування їхніх монокристалів і особливо – наноструктур, наприклад, наноострівців.

2. САМООРГАНІЗАЦІЯ АТОМІВ В РІДИНІ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Рідкий стан речовини, у відмінність від кристалічного, характеризується відсутністю дальнього по-

рядку в розташуванні атомів. Однак в рідині наявна регулярна структура в межах найближчих сусідніх координаційних сфер, тобто ближній порядок. При цьому в розплавах металів виявлені впорядковані мікроутворення (мікрокластери), структура яких повторює структуру відповідних кристалів [2]. Такі мікроутворення часто вважають наслідком неповного плавлення твердої речовини (ефект «післяплавлення»). Однак, мікрокластери спостерігаються в різноманітних рідинах, в тому числі в таких, що сконденсувалися з газової фази, наприклад, в рідкому криптоні [5].

Експериментально було встановлено [6], що розплави германію й кремнію мають електронний тип електропровідності та міжатомний хімічний зв'язок металевого типу. Оскільки взаємодія іонів Ge^{+4} або Si^{+4} з вільними електронами в розплаві повністю нейтралізує їхній заряд, то в подальшому будемо розглядати їхнє поведіння як поведіння атомів. За результатами вимірювання кривих інтенсивності розсіювання рентгенівських променів було встановлено середнє координаційне число атомів в розплавах: германію – $KЧ = 5,9 \pm 0,2$, кремнію – $KЧ = 6,9 \pm 0,3$. Середня відстань між найближчими сусідами в розплавах поблизу температури плавлення: в германії – 0,275 нм, в кремнії – 0,270 нм [6].

При фазовому переході рідина – кристал тип міжатомного хімічного зв'язку в германії й кремнії змінюється на ковалентний. Така зміна суттєво впливає на координацію атомів. В твердому стані германій і кремній мають кристалічну решітку, яка належить до структурного типу алмазу, просторової групи симетрії $F\bar{d}3m$. Координаційне число – $KЧ = 4$, координаційний багатогранник – тетраедр; відстань між найближчими сусідами: в германії – 0,244 нм, в кремнії – 0,235 нм [7]. Таким чином, при кристалізації цих речовин атоми зближуються, але внаслідок жорсткої спрямованості ковалентних зв'язків структура стає ажурною і густина речовини d зменшується: германію – з 5510 кг м^{-3} до 5260 кг м^{-3} , кремнію – з 2530 кг м^{-3} до 2328 кг м^{-3} [6].

* akgolovko@gmail.com

За результатами інших експериментальних досліджень [8-10] в розплавах германію й кремнію присутні мікроутворення з ковалентними міжатомними зв'язками. Зокрема, в [10] по експериментальним даним дифракційного розсіювання рентгенівських променів розплавом германію було виконано моделювання за зворотним методом Монте Карло та статистико-геометричний аналіз на основі багатограників Вороного-Делоне. Встановлено, що атоми германію в розплаві утворюють ланцюжки з міжатомними відстанями 0,245...0,330 нм, які близьки до довжини ковалентного зв'язку в кристалі германію (0,245 нм). Автори [10] зробили висновок, що при температурі на 20 °С вище за температуру плавлення германію до складу таких мікроутворень входить $\approx 45\%$ атомів розплаву.

Мета даної роботи – вивчити особливості самоорганізації атомів в розплавах германію й кремнію в залежності від температури за допомогою моделювання розподілу за розмірами мікрокластерів їхніх атомів.

3. МОДЕЛЬ РОЗПОДІЛУ ЗА РОЗМІРАМИ МІКРОКЛАСТЕРІВ В РОЗПЛАВАХ ГЕРМАНІЮ Й КРЕМНІЮ

При моделюванні використовуємо наступні припущення:

- мікрокластери в розплаві германію чи кремнію утворюються випадковим чином (як це прийнято в роботі [5] для простої рідини);
- мікрокластери мають форму ланцюжків і можуть складатися з декількох до необмеженої кількості часток;
- в рівноважному стані середовища встановлюється певний розподіл мікрокластерів за розміром.

Розмір кластера будемо характеризувати сумарною довжиною ланок ланцюжка, яка в безрозмірному вигляді може бути представлена як

$$n = \frac{1}{l_c} \sum_{i=1}^{\infty} l_i,$$

де n – кількість міжатомних зв'язків у ланцюжку; l – середня довжина одного міжатомного зв'язку в ланцюжку, м; l_c – довжина ковалентного зв'язку у відповідному кристалі, м.

Враховуючи, що за експериментальними даними роботи [10] міжатомні відстані в ланцюжках лежать в інтервалі 0,245...0,330 нм, а довжина ковалентного зв'язку в кристалі германію $l_c = 0,245$ нм, величина n є неперервною в певному інтервалі і може описуватися розподілом для неперервних величин.

Для системи мікрокластерів у формі ланцюжків обираємо гамма-розподіл, оскільки за даними [11] він був успішно застосований для опису розподілу за довжиною ланцюжків струмопровідних порошків у повітрі. З сімейства законів гамма-розподілу обираємо розподіл із зсувом, щільність ймовірностей якого описується функцією

$$f(n) = \frac{(n-c)^{\alpha-1}}{F(\alpha) \cdot \theta^{\alpha} \cdot \exp[(n-c)/\theta]},$$

де $F(\alpha) = \int_0^{+\infty} n^{\alpha-1} \exp(-n) dn$ – гамма-функція від аргументу α ; $\alpha > 1$ – параметр форми; θ – параметр масштабу та c – параметр зсуву гамма-розподілу.

Кількість міжатомних зв'язків між атомами ланцюжка на одиницю менша за кількість атомів, які входять до його складу:

$$n \approx N - 1, \quad (1)$$

де N – кількість атомів, які входять до складу ланцюжка. Знак \approx в виразі (1) є наслідком того факту, що кількість атомів у складі ланцюжка N – ціле число, на відміну від n .

Виходячи з того, що $n + 1 \approx N$, для параметра зсуву обираємо значення $c = -1$. Тоді функція щільності ймовірностей розподілу ланцюжків за кількістю міжатомних зв'язків в них набуває вигляду

$$f(n) = \frac{(n+1)^{\alpha-1}}{F(\alpha) \cdot \theta^{\alpha} \cdot \exp\left(\frac{n+1}{\theta}\right)}. \quad (2)$$

Два інші параметри розподілу (3) – α і θ – мають бути функціями структурно чутливих фізичних параметрів розплаву, які впливають на процес кластеризації. На процеси об'єднання атомів ковалентними зв'язками та руйнування цих зв'язків впливає енергія теплового руху атомів, тобто температура, а також їхня рухливість, яка на макрорівні проявляється як в'язкість рідини. Дослідження розплавів напівпровідників та силіцидів показало, що їхня в'язкість поблизу температури плавлення різко зростає, особливо при невеликому переохолодженні розплаву [12]. Таку аномальну поведінку структурно чутливого параметра автори [12] пояснюють з позиції утворення в розплаві асоціатів (мікрокластерів). Тому параметр форми розподілу α обираємо в вигляді

$$\alpha = \frac{\eta(T)}{\eta(T_B)}, \quad (3)$$

де η – динамічна в'язкість розплаву, Н·сек·м⁻²; T – температура, К; T_B – температура його кипіння, К.

Для побудови параметра масштабу розподілу обираємо густину розплаву, яка характеризує середню відстань між атомами:

$$\theta = \frac{d(T)}{d(T_B)} + \frac{d(T_m) - d(T_B)}{d(T_B)}, \quad (4)$$

де d – густина розплаву, кг·м⁻³; T_m – температура плавлення, К.

При обраному визначенні функції щільності ймовірностей (2) і параметра $c = -1$ математичне очікування Γ -розподілу, що дорівнює $(\alpha \cdot \theta)$, має фізичний зміст середньої кількості, а мода розподілу $(\alpha - 1)\theta$ – найбільш імовірної кількості атомів у ланцюжку.

4. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Для визначення числових значень величин $\alpha(T)$ за виразом (3) і $\theta(T)$ за (4) використовуємо дані з роботи [13] по експериментальним залежностям $\eta(T)$

та $d(T)$ для розплавів германію й кремнію. В такий спосіб функція розподілу (2) стає неявно залежною від температури.

Критичні температури, густина та динамічна в'язкість цих розплавів відрізняються дуже суттєво (германію: $T_m = 1210,6$ К, $T_B = 3103,6$ К, $(T_B - T_m) = 1893$ К, $d(T_m) = 5510$ кг м⁻³, $d(T_B) = 4400$ кг м⁻³, $\eta(T_m) = 7,6 \cdot 10^{-4}$ Н сек м⁻², $\eta(T_B) = 4,4 \cdot 10^{-4}$ Н сек м⁻²; кремнію: $T_m = 1688$ К, $T_B = 2623$ К, $(T_B - T_m) = 935$ К, $d(T_m) = 2530$ кг м⁻³, $d(T_B) = 2210$ кг м⁻³, $\eta(T_m) = 8,8 \cdot 10^{-4}$ Н сек м⁻², $\eta(T_B) = 4,1 \cdot 10^{-4}$ Н сек м⁻²) [13].

Однак криві розподілу для розплавів германію й кремнію виявилися дуже близькими при температурах плавлення, (рис. 1, криві 1 і 2), а при температурах кипіння – майже співпадають (рис. 1, криві 3 і 4).

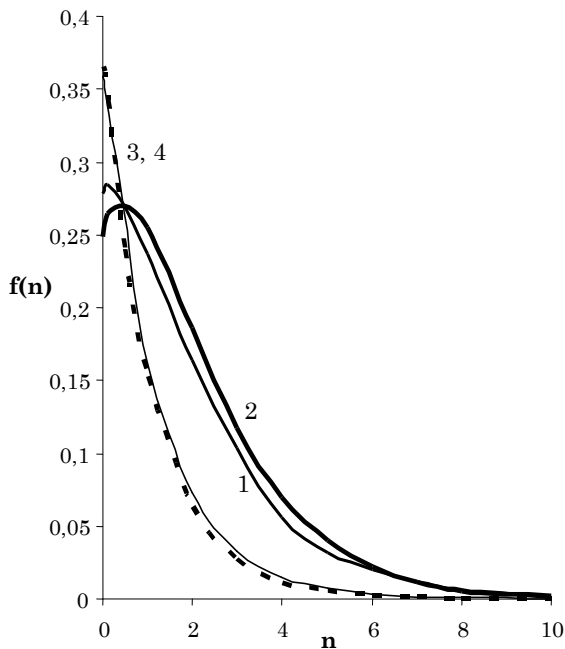


Рис. 1 – Щільність ймовірностей розподілу атомних ланцюжків за кількістю міжатомних зв'язків для розплавів при температурі плавлення (крива 1 – Ge, крива 2 – Si) та при температурі кипіння (крива 3 – Ge, крива 4 – Si)

Цей факт свідчить про схожість процесів самоорганізації атомів у розплавах цих двох напівпровідників.

При обраному визначенні параметра форми розподілу a (3) при температурі кипіння розплаву T_B $a = 1$, і функція Г-розподілу вироджується до показникової (експоненціальної):

$$f(n) = \frac{1}{\theta \cdot \exp\left(\frac{n+1}{\theta}\right)}. \quad (5)$$

Відповідно, при температурі кипіння і в германієвому, і у кремнієвому розплавах найбільше значення щільності ймовірностей спостерігається при $n=0$ (рис. 1, криві 3 і 4), $N=1$, тобто для поодиноких атомів.

При зниженні температури розплаву від температури кипіння щільність ймовірностей для поодиноких атомів $f(0)$ зменшується спочатку слабо, але при наближенні до температури плавлення різко падає, особливо в розплаві кремнію (рис. 2).

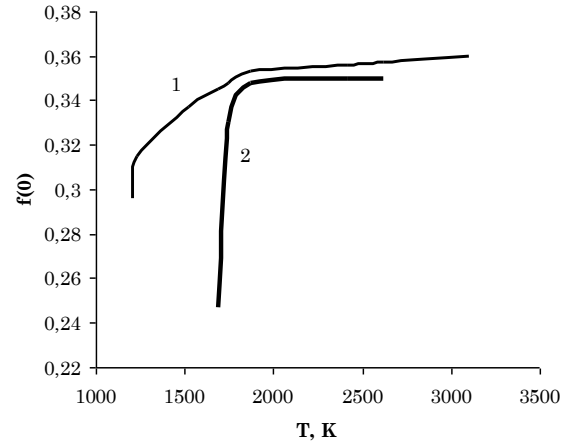


Рис. 2 – Щільність ймовірностей присутності поодиноких атомів в розплаві в залежності від температури (крива 1 – Ge, крива 2 – Si)

Різка зменшення щільності ймовірностей існування окремих атомів в розплаві означає збільшення щільності ймовірностей мікрокластерів, тобто значне посилення процесу кластеризації поблизу температури плавлення. Такий результат моделювання розподілу мікрокластерів в розплавах германію й кремнію функцією (2) з параметрами (3), (4) добре узгоджується з літературними даними по експериментальним дослідженням металів та деяких напівпровідників [4, 12].

При температурі плавлення в розплаві германію максимум щільності ймовірностей відповідає $n = 0,094$ (див. рис. 1, крива 1), тобто фактично поодиноким атомам ($N=1$). В розплаві кремнію при температурі плавлення ймовірність для поодиноких атомів менше, ніж в розплаві германію, а її максимум відповідає $n \approx 1$ (див. рис. 1, крива 2), тобто $N=2$. Таким чином, на відміну від германію, в розплаві кремнію поблизу температури плавлення найбільша ймовірність відповідає не поодинокому атому, а димеру – парі атомів, поєднаних ковалентним зв'язком.

Щільність ймовірностей існування при температурі плавлення мікрокластерів в формі ланцюжка з п'яти атомів ($n \approx 4$, $N=5$) в розплаві германію $\approx 6\%$ а кремнію $\approx 7\%$ (див. рис. 1). Цей результат узгоджується з даними роботи [10], автори якої, ґрунтуючись на експериментальних даних по дифракційному розсіюванню рентгенівських променів, зробили висновок, що при температурі на 20°C вище за температуру плавлення атомні ланцюжки в розплаві германію містять до п'яти атомів.

Середня кількість атомів у ланцюжковому мікрокластері при температурі плавлення в розплаві германію $Aver = 2,60$, а в розплаві кремнію – $Aver = 2,77$. Цей результат моделювання добре узгоджується також з даними роботи [10], де наведена оцінка середнього координатного числа в ланцюжку атомів германію – 1,3. Зауважимо, що в ланцюжку з трьох атомів середнє координатне число дорівнює 1,333, а з двох атомів – 1,0. Тобто отриманий нами результат моделювання вказує на те, що всередньому ланцюжок містить 2 або 3 атоми. Зі зростанням температури середня кількість атомів у ланцюжкових мікрокластерах зменшується і при температурі кипіння досягає величини 1,25 в германієвому розплаві та 1,15 – у кремнієвому (рис. 3).

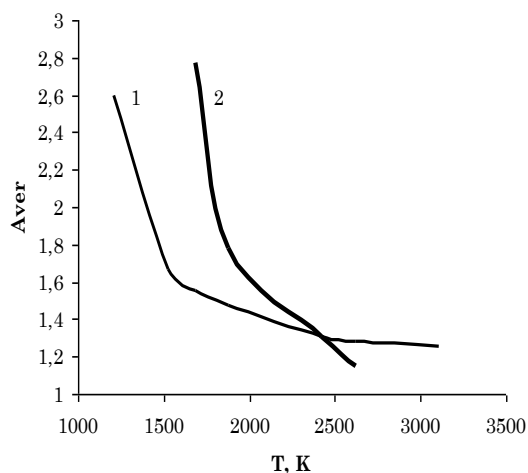


Рис. 3 – Середня кількість атомів в складі ланцюжкових мікрокластерів в розплаві в залежності від температури (крива 1 – Ge, крива 2 – Si)

Звідси впливає відмінність кількісної характеристики процесів самоорганізації в цих розплавах: в германієвому при температурі плавлення середня кількість атомів у ланцюжках трохи менша, а при температурі кипіння – дещо більша, ніж в кремнієвому.

Присутність в розплавах мікроутворень у вигляді атомних ланцюжків має впливати на кінетику процесів кристалізації. Зокрема, в [14] цей фактор врахований при розгляді механізму прискореної кристалізації кремнію.

5. ВИСНОВКИ

З результатів експериментальних та теоретичних досліджень ряду авторів випливає, що в процесі поверхневої дифузії під час молекулярно-променевої епітаксії, а також об'ємної дифузії в твердій фазі під час відпалу атоми германію й кремнію схильні до формування впорядкованих мікроутворень. Спонтанне впорядкування атомів германію й кремнію виявлено й в розплавах більшості металів та деяких напівпровідників. В кількох роботах показано, що в розплавах германію й кремнію, де переважають міжатомні зв'язки металевого типу, спостерігаються мікроутворення з ковалентними зв'язками, які мають форму атомних ланцюжків.

Для статистичного моделювання системи мікрокластерів у формі ланцюжків в розплавах германію й кремнію нами обрано гамма-розподіл, два параметра якого враховують структурнозалежні параметри розплаву – їхні густину та в'язкість.

Результати моделювання показали, що при температурі кипіння і в германієвому, і у кремнієвому розплавах найбільше значення щільності ймовірностей спостерігається для поодиноких атомів. При цьому щільність ймовірностей існування атомних лан-

цюжків з двох – чотирьох атомів досить суттєва (27 %–3 %). При зниженні температури розплав від температури кипіння щільність ймовірностей для поодиноких атомів зменшується спочатку слабо, але при наближенні до температури плавлення різко падає, особливо в розплав кремнію. Такий результат добре узгоджується з літературними даними по експериментальним дослідженням металів та деяких напівпровідників, за якими процес кластеризації посилюється саме поблизу температури плавлення.

При температурі плавлення в розплав германію максимум щільності ймовірностей відповідає поодиноким атомам, а в розплав кремнію димерам – парі атомів, поєднаних ковалентним зв'язком. Щільність ймовірностей існування залишається суттєвою і для мікроланцюжків з 3...5 атомів: в розплав германію $\approx 6\%$ а кремнію $\approx 7\%$. Цей результат узгоджується з даними роботи [10], автори якої, ґрунтуючись на експериментальних даних по дифракційному розсіюванню рентгенівських променів, зробили висновок, що при температурі на 20°C вище за температуру плавлення атомні ланцюжки в розплав германію містять до п'яти атомів.

Середня кількість атомів у ланцюжковому мікрокластері при температурі плавлення в розплав германію $Aver = 2,60$, а в розплав кремнію – $Aver = 2,77$, тобто всередньому ланцюжок містить 2 або 3 атоми. З цього випливає, що середнє координаційне число атомів в ланцюжках дорівнює від 1,0 до 1,33. Цей результат моделювання також добре узгоджується з даними роботи [10], де наведена оцінка середнього координаційного числа в ланцюжку атомів германію поблизу температури плавлення – 1,3. Зі зростанням температури середня кількість атомів у ланцюжкових мікрокластерах зменшується і при температурі кипіння досягає величини 1,25 в германієвому розплаві та 1,15 – у кремнієвому.

В цілому розподіл мікрокластерів в германії й кремнії дуже схожі. Однак кількісні характеристики процесів самоорганізації в цих розплавах дещо відмінні: при температурі плавлення в германієвому середня кількість атомів у ланцюжках трохи менша, а при температурі кипіння – дещо більша, ніж в кремнієвому.

Таким чином, обрана модель дає результати, що добре узгоджуються з відомими експериментальними даними. Оскільки прямі методи спостереження мікроутворень у розплавах з високою температурою на сьогодні відсутні, то поглиблення теоретичних уявлень щодо характеру самоорганізації атомів в них мають практичне значення для управління процесами виготовлення монокристалів для мікроелектроніки та напівпровідникових наноструктур для оптоелектроніки.

Самоорганизация атомов в расплавах германия и кремния

Е.Я. Швец, И.Ф. Червоный, А.К. Головки

Запорожская государственная инженерная академия, пр. Ленина, 226, 69006 Запорожье, Украина

Обоснована склонность атомов германия и кремния к самоорганизации в расплавах с образованием микрокластеров в форме цепочек с ковалентными межатомными связями. Разработана модель распределения микрокластеров по размерам. При помощи модели оценены максимально вероятное и среднее количество атомов в микрокластере в зависимости от температуры. При температуре плавления в расплаве германия среднее количество атомов в цепочке $Aver = 2,60$, а максимально вероятное их количество ≈ 1 . Соответственно, в расплаве кремния $Aver = 2,77$, а максимально вероятное количество атомов ≈ 2 . При температуре кипения в обоих расплавах максимальная плотность вероятностей отвечает единичным атомам. Результаты оценок хорошо согласовываются с экспериментальными данными из литературы. Работа преследует цель углубления представлений о процессах самоорганизации и структурной перестройки в расплавах элементарных полупроводников, которые влияют на механизм процесса кристаллизации.

Ключевые слова: Микро- и нанoeлектроника, Германий, Кремний, Расплав, Микрокластер, Атомная цепочка, Плотность вероятностей.

Self-organising of Atoms in Germanium and Silicon Melts

E.J. Shvets, I.F. Chervony, O.K. Golovko

Zaporizhzhya State Engineering Academy, 226, Lenina Ave., 69006 Zaporizhzhya, Ukraine

Propensity of germanium and silicon atoms to self-organizing in melts with formation microclusters in the form of chains with covalent internuclear communications is proved. It is developed distributions model in the sizes of microclusters. By means of model are estimated as much as possible probable and average quantity of atoms in microcluster depending on temperature. At melting temperature in germanium melt average quantity of atoms in chain $Aver = 2,60$, and their as much as possible probable quantity ≈ 1 . Accordingly, in silicon melt $Aver = 2,77$, and as much as possible probable quantity of atoms ≈ 2 . At boiling temperature in both melts the maximum density of probabilities answers individual atoms. Results of estimations well coordinated with experimental data from the literature. Work pursues the aim of deepening of representations about processes of self-organising and structural reorganisation in melts elementary semiconductors which influence on crystallization mechanism.

Keywords: Micro-and nanoelectronics, Germanium, Silicon, Melt, Microcluster, Nuclear chain, Density of probabilities.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. А.Н. Яремко, М.Я. Валах, В.Н. Джаган, П.М. Литвин, В.Я. Юхимчук, *ФТП*. **40** № 4, 391 (2006) (A.M. Yaremko, M.Ya. Valakh, V.N. Dzhagan, P.M. Lytvyn, V.A. Yukhymchuk, *Semiconductors* **40** No 4, 385 (2006)).
2. Roushdey Salh, L. Fitting, E.V. Kolesnikova, A.A. Sitnikova, M.V. Zamoryanskaya, B. Schmidt, H. -J. Fitting, *Semiconductors*. **41** No 4, 381 (2007).
3. Г.Э. Цирлин, В.Г. Дубровский, Н.Ф. Сибирев, И.П. Сошников, Ю.Б. Самсоненко, А.А. Тонких, В.М. Устинов, *ФТП* **39** № 5, 587 (2005) (G.E. Tsyrlin, V.G. Dubrovskiy, N.F. Sibirev, I.P. Soshnikov, Yu.V. Samsonenko, A.A. Tonkikh, V.M. Ustinov, *Semiconductors* **39** No 5, 587 (2005)).
4. Н.А. Ватолин, ras.ru/FStorage/download.
5. Г.А. Мельников, В.Н. Вервейко, В.Г. Мельников, А.Ю. Версокин, Д.В. Вервейко, *Ученые записки: электронный научный журнал Курского государственного университета* № 1(21) (2012).
6. Ю.Г. Полтавцев, *Структура полупроводниковых расплавов* (Москва: Металлургия: 1984) (Yu.G. Poltavtsev, *Struktura poluprovodnikovykh rasplavov* (Moskva: Metallurgiya: 1984)).
7. М.П. Шаскольская, *Кристаллография* (Москва: Вышш. Школа: 1976) (M.P. Shaskol'skaya, *Kristallografiya* (Moskva: Vyssh. Shkola: 1976)).
8. R. Goto, F. Shimojo, S. Nunejiri, K. Hoshino, *J. Phys. Soc. Jpn.* **73** No 10, 2746 (2004).
9. Y. Naito, V. Inui, T. Anai, K. Tamura, *J. Non-Crystalline Solids* **353**, 3376 (2007).
10. В.П. Казимиров, А.С. Роик, В.М. Перевертайло, О.Б. Логинова, С.А. Лисовенко, *Сверхтвердые материалы* № 4, 35 (2008) (V.P. Kazimirov, A.S. Roik, V.M. Perevertaylo, O.B. Loginova, S.A. Lisovenko, *Sverkhтвердые материалы* № 4, 35 (2008)).
11. А.И. Орлов, *Математика случая. Вероятность и статистика – основные факты* (М.: МЗ-Пресс, 2004).
12. А.Р. Регель, В.М. Глазов, *Закономерности формирования структуры электронных расплавов* (Москва: Наука: 1982) (A.R. Regel', V.M. Glazov, *Zakonomernosti formirovaniya struktury elektronnykh rasplavov* (Moskva: Nauka: 1982)).
13. В.М. Глазов, С.Н. Чижевская, Н.Н. Глаголева, *Жидкие полупроводники* (Москва: Наука: 1967) (V.M. Glazov, S.N. Rayevskaya, N.N. Glagoleva, *Zhidkiye poluprovodniki* (Moskva: Nauka: 1967)).
14. И.Ф. Червоный, Е.Я. Швец, Ю.В. Головки, С.Г. Егоров, *Восточно-Европейский журнал передовых технологий* № 6/5 (54), 79 (2011) (I.F. Chervonyu, Ye.Ya. Shvets, Yu.V. Golovko, S.G. Yegorov, *Est-Eur. J. Enterprise Technol.* No 6/5 (54), 79 (2011)).