

**КЛАСТЕРНАЯ САМООРГАНИЗАЦИЯ ИНТЕРМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ:  
НОВЫЙ ТРЕХСЛОЙНЫЙ КЛАСТЕР-ПРЕКУРСОР  
K136 =  $0@Zn_{12}@32(Mg_{20}Zn_{12})@92(Zr_{12}Zn_{80})$  И НОВЫЙ ДВУХСЛОЙНЫЙ  
КЛАСТЕР-ПРЕКУРСОР K30 =  $0@Zn_6@Zn_{24}$  В КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ  
СТРУКТУРЕ  $Zr_6Mg_{20}Zn_{128}-cP154$**

© 2020 г. В. Я. Шевченко<sup>1, \*</sup>, В. А. Блатов<sup>2</sup>, Г. Д. Илюшин<sup>2, 3</sup>

<sup>1</sup>Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН,  
наб. Макарова, 2, Санкт-Петербург, 199034 Россия

<sup>2</sup>Межвузовский научно-исследовательский центр по теоретическому материаловедению,  
Самарский государственный технический университет,  
ул. Молодогвардейская, 244, Самара, 443011 Россия

<sup>3</sup>Федеральный научно-исследовательский центр “Кристаллография и фотоника”,  
Ленинский пр., 59, Москва, 119333 Россия

\*e-mail: shevchenko@isc.nw.ru

Поступила в редакцию 10.07.2020 г.

После доработки 30.07.2020 г.

Принята к публикации 06.08.2020 г.

С помощью компьютерных методов (пакета программ ToposPro) осуществлен геометрический и топологический анализ кристаллической структуры интерметаллида  $Zr_6Mg_{20}Zn_{128}-cP154$  с параметрами кубической ячейки:  $a = 13.709 \text{ \AA}$ ,  $V = 2576.42 \text{ \AA}^3$ , и пр. группой  $Pm-3$ . Установлены два новых нанокластера-прекурсора с симметрией  $-43m$ : трехслойный нанокластер K136 состава  $0@Zn_{12}@32(Mg_{20}Zn_{12})@92(Zr_{12}Zn_{80})$  с внутренним икосаэдром  $0@Zn_{12}$  и с 12 атомами Zr и 20 атомами Zn в 60 – атомной Zn-оболочке и двухслойный нанокластер K30 состава  $0@Zn_6@Zn_{24}$  с внутренним  $Zn_6$ -октаэдром и с 24 атомами Zn во внешней оболочке. Реконструирован симметричный и топологический код процессов самосборки 3D структур из нанокластеров-прекурсоров K136 и K30 в виде: первичная цепь  $\rightarrow$  микрослой  $\rightarrow$  микрокаркас. В качестве спейсеров, занимающих пустоты в 3D каркасе из нанокластеров K136 и K30, установлены димеры  $Zn_2$ .

**Ключевые слова:** интерметаллид  $Zr_6Mg_{20}Zn_{128}-cP154$ , самосборка кристаллической структуры, новые нанокластеры-прекурсоры K136 =  $0@Zn_{12}@32(Mg_{20}Zn_{12})@92(Zr_{12}Zn_{80})$  и K30 =  $0@Zn_6@Zn_{24}$

DOI: 10.31857/S0132665120060220

## ВВЕДЕНИЕ

В 357 тройных системах  $A-B-Zn$  с участием 59 химических элементов установлено образование около 900 интерметаллических соединений [1, 2]. В двадцати тройных системах  $A-Mg-Zn$  получены около 100 интерметаллических соединений. Наибольшее число тройных интерметаллидов образуется в системе  $A-Mg-Zn$  с атомами Y (восемь соединений), Ag (семь соединений) и Al (пять соединений). По одному тройному соединению получено в системах с атомами Ti, Zr, Hf, и Er (табл. 1) [3–12].

Новое кристаллохимическое семейство тройных интерметаллидов  $A_6Mg_{20}Zn_{128}-cP154$  ( $A = Ti, Zr, Hf$ ) было открыто в 2008 г [4]. Кристаллические структуры  $A_6Mg_{20}Zn_{128}$ , как

Таблица 1. Кристаллохимические данные тройных интерметаллидов

Интерметаллид	Группа симметрии	Параметры элементарной ячейки, Å и градусы, °	$V, \text{Å}^3$	Индекс Пирсона
$\text{Ho}_{26}\text{Mg}_{17}\text{Zn}_{99}$ [3]	$P6_3/mmc$ (194)	14.259, 14.259, 14.007	2466.3	$hP162$
$\text{Ti}_6\text{Mg}_{20}\text{Zn}_{128}$ [4]	$Pm-3$ (200)	13.554, 13.554, 13.554	2490.1	$cP168$
$\text{Hf}_6\text{Mg}_{20}\text{Zn}_{128}$ [4]	$Pm-3$ (200)	13.674, 13.674, 13.674	2556.7	$cP168$
$\text{Zr}_6\text{Mg}_{20}\text{Zn}_{128}$ [4]	$Pm-3$ (200)	13.709, 13.709, 13.709	2576.4	$cP168$
$\text{Sc}_3(\text{Mg}_{0.18}\text{Zn}_{17.73})$ [5]	$Im-3$ (204)	13.863, 13.863, 13.863	2664.2	$cI184$
$\text{Mg}_{19}\text{Zn}_{15}\text{Al}_4$ [6]	$Cmcm$ (63)	14.095, 10.255, 18.986	2744.3	$oS152$
$\text{Ho}_{11}\text{Mg}_{15}\text{Zn}_{74}$ [7]	$Im-3$ (204)	14.092, 14.092, 14.092	2798.7	$cI162$
$\text{Mg}_{11}\text{Al}_6\text{Zn}_{11}$ [8]	$Im-3$ (204)	14.160, 14.160, 14.160	2839.2	$cI162$
$\text{Mg}_{32}\text{Al}_{12}\text{Zn}_{36}$ [9]	$Im-3$ (204)	14.184, 14.184, 14.184	2853.9	$cI160$
$\text{Mg}_4\text{Al}_{1.69}\text{Zn}_{2.31}$ [8]	$Pbcm$ (57)	8.882, 16.774, 19.479	2902.2	$oP152$
$\text{Mg}_4\text{Al}_{2.1}\text{Zn}_{1.9}$ [8]	$Pbcm$ (57)	8.937, 16.812, 19.586	2942.9	$oP152$
$\text{Y}_{16}\text{Mg}_{116}\text{Zn}_{12}$ [10]	$C2/m$ (12)	11.116, 19.256, 16.064, 90.00, 76.66, 90.00	3345.9	$mS144$
$\text{Er}_{16}\text{Mg}_{140}\text{Zn}_{12}$ [10]	$P6_3/mcm$ (193)	11.110, 11.110, 36.470	3898.5	$hP168$
$\text{Y}_2\text{Mg}_{13}\text{Zn}$ [11]	$P6_322$ (182)	11.170, 11.170, 36.370	3929.9	$hP168$
$\text{Sm}_{6.5}\text{Zn}_{40.5}\text{Mg}_{15}$ [12]	$P6_3/mmc$ (194)	23.500, 23.500, 8.600	4113.1	$hP248$

и описанные ранее кристаллические структуры тройных интерметаллидов  $\text{Mg}_{0.18}\text{Sc}_3\text{Zn}_{17.73}$  [5],  $\text{Ho}_{11}\text{Mg}_{15}\text{Zn}_{74}$  [7],  $\text{Mg}_{32}(\text{Al},\text{Zn})_{49}$  [8],  $\text{Mg}_{32}\text{Al}_{12}\text{Zn}_{37}$  [9], рассматривались как 1/1 квазикристаллические аппроксиманты, а  $\text{Sc}_{11.18}\text{Mg}_{2.52}\text{Zn}_{73.61}$ - $cP704$  как 2/1 квазикристаллический аппроксимант [5].

Интерметаллид  $\text{Zr}_6\text{Mg}_{20}\text{Zn}_{128}$ - $cP154$  характеризуется параметрами кубической ячейки:  $a = 13.709 \text{ Å}$ ,  $V = 2576.42 \text{ Å}^3$ , и пр. группой  $Pm-3$  [4]. Уникальная последовательность Вайкоффа для 14 кристаллографически независимых атомов имеет вид  $P^2k^2f^3hg^2f^2$ . Значения КЧ (координационных чисел) атомов Mg – 16 (два атома), Zr – 15 (один атом), атомов Zn – 8 (один атом), 11 (два атома), 12 (три атома), 13 (три атома) и 14 (два атома).

В настоящей работе проведен геометрический и топологический анализ кристаллической структуры интерметаллида  $\text{Zr}_6\text{Mg}_{20}\text{Zn}_{128}$ - $cP154$  (пакет программ ToposPro [13]). Установлен симметричный и топологический код процессов кластерной самосборки кристаллической структуры в виде: первичная цепь  $S_3^1 \rightarrow$  микрослой  $S_3^2 \rightarrow$  микрокаркас  $S_3^3$ .

Работа продолжает исследования [14–22] в области моделирования процессов самоорганизации систем на супраполиэдрическом уровне и геометрического и топологического анализа кристаллических структур с применением современных компьютерных методов.

**Таблица 2.**  $Zr_6Mg_{20}Zn_{128}$ . Координационные последовательности атомов

Атом	Локальное окружение	Координационные последовательности				
		$N_1$	$N_2$	$N_3$	$N_4$	$N_5$
Mg1	3Mg + 13Zn	16	53	110	214	347
Mg2	3Mg + 13Zn	16	48	111	205	322
Zn1	5Mg + 6Zn	11	46	106	186	310
Zn2	2Mg + 9Zn + 1Zr	12	46	111	197	314
Zn3	4Mg + 9Zn + 1Zr	14	53	117	218	356
Zn4	2Mg + 9Zn + 1Zr	12	47	111	199	320
Zn5	11Zn	11	46	105	209	332
Zn6	12Zn + Zr	13	49	110	210	330
Zn7	2Mg + 11Zn	13	48	102	195	334
Zn8	5Mg + 6Zn + Zr	12	50	111	203	337
Zn9	12Zn + 2Zr	14	49	117	218	334
Zn10	1Mg + 12Zn	13	48	111	198	341
Zn11	8Zn	8	37	96	185	296
Zr1	15Zn	15	44	104	203	316

### МЕТОДИКИ, ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ПРИ КОМПЬЮТЕРНОМ АНАЛИЗЕ

Геометрический и топологический анализ осуществляли с помощью комплекса программ ToposPro [13], позволяющего проводить многоцелевое исследование кристаллической структуры в автоматическом режиме, используя представление структур в виде “свернутых графов” (фактор-графов). Данные о функциональной роли атомов при образовании кристаллической структуры получены расчетом координационных последовательностей, т.е. наборов чисел  $\{N_k\}$ , где  $N_k$  – число узлов в  $k$ -ой координационной сфере атома.

Полученные значения координационных последовательностей атомов в 3D-сетках, приведены в табл. 2, в которой жирным шрифтом выделено число соседних атомов в ближайшем окружении, т.е. в первой координационной сфере атома. Все атомы характеризуются различными наборами координационных последовательностей  $\{N_k\}$ , следовательно, все атомы топологически (и функционально) различны.

При идентификации типа нанокластера-прекурсора кристаллической структуры интерметаллида использовали алгоритм разложения структуры на простейшие нанокластеры на основе следующих принципов: структура образуется самосборкой из нанокластеров-прекурсоров, нанокластеры-прекурсоры занимают высокосимметричные позиции, нанокластеры-прекурсоры образуют упаковку, т.е. не имеют общих атомов, в каркасных структурах, отдельные атомы или небольшие атомные группировки играют роль спейсеров – заполнителей пространства между нанокластерами-прекурсорами. Набор нанокластеров-прекурсоров и спейсеров включает в себя все атомы структуры.

**Таблица 3.** Нанокластер K136. Атомы, формирующие внутренний икосаэдрический кластер K12 = 0@Zn<sub>12</sub>, 32- и 92-атомную оболочку

$$K136 = (0@Zn_{12}@32(Mg_{20}Zn_{12})@92(Zr_{12}Zn_{80}))$$

Кластер K12	Вторая оболочка	Третья оболочка
12 Zn1	12 Mg1	8 Zn10
	8 Mg2	24 Zn2
	12 Zn8	12 Zn3
		24 Zn4
		12 Zn7
		12 Zr1
<b>Всего 136 атомов</b>		

### САМОСБОРКА КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ $Zr_6Mg_{20}Zn_{128}$ -сP154

Использованный метод моделирования кристаллической структуры основан на определении иерархической последовательности ее самосборки в кристаллографическом пространстве [14, 15]. На первом уровне самоорганизации системы определяется механизм формирования первичной цепи структуры из нано кластеров 0-уровня, сформированных на темплатной стадии химической эволюции системы, далее – механизм самосборки из цепи микрослоя (2-ой уровень) и затем из микрослоя – трехмерного микрокаркаса структуры (3-й уровень).

#### *Кристаллографические данные $Zr_6Mg_{20}Zn_{128}$ -сP154*

Пространственная группа *Pm-3* (по. 200) характеризуется позициями с точечной симметрией: *m-3* (1a, 1b), *mmm* (3c, 3d) и др. Метод полного разложения 3D факторграфа структуры на кластерные подструктуры был использован для определения каркас-образующих нанокластеров кристаллической структуры. Число вариантов разложения на кластерные подструктуры с числом выделенных кластеров, равным 2, 3, 4, 5 и 6, составило 6, 31, 53, 77 и 27 соответственно. В результате установлены два новых нанокластера-прекурсора с симметрией *-43m* (рис. 1–3): трехслойный нанокластер K136 = 0@Zn<sub>12</sub>@32(Mg<sub>20</sub>Zn<sub>12</sub>)@92(Zr<sub>12</sub>Zn<sub>80</sub>) с внутренним икосаэдром 0@Zn<sub>12</sub>, второй оболочкой с 12 атомами Zn и 20 атомами Mg, и третьей оболочкой с 12 атомами Zr и 20 атомами Zn, занимающими все позиции над 5- и 6-атомными кольцами 60-атомного Zn-полиэдра топологического типа фуллерена C<sub>60</sub>, двухслойный нанокластер K30 = 0@Zn<sub>6</sub>@Zn<sub>24</sub> с внутренним Zn<sub>6</sub>-октаэдром и с 24 атомами Zn во внешней оболочке. В качестве спейсеров, занимающих пустоты в 3D каркасе из нанокластеров K136 и K30, установлены димеры Zn<sub>2</sub>.

#### *Самосборка кристаллической структуры $Zr_6Mg_{20}Zn_{128}$*

**Первичная цепь.** Самосборка первичных цепей S<sub>3</sub><sup>1</sup> происходит при связывании нанокластеров K136 в направлении [100] (рис. 4). Расстояние между центрами кластеров K136 соответствует длине вектора трансляции  $a = 13.709 \text{ \AA}$ .

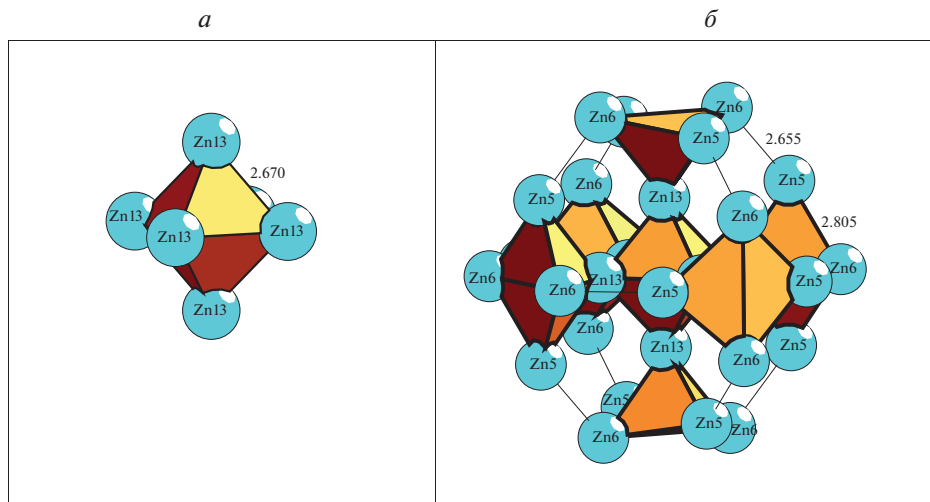


Рис. 1.  $Zr_6Mg_{20}Zn_{128}$ .  $Zn_6$ -октаэдр (а), двухслойный кластер  $K30 = 0@Zn_6@Zn_{24}$  (б). Указаны длины связей в Å.

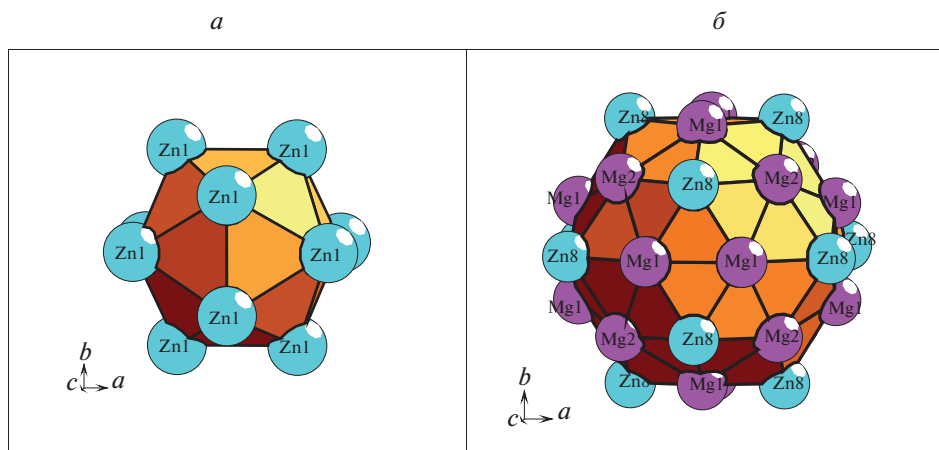


Рис. 2.  $Zr_6Mg_{20}Zn_{128}$ . Кластер-темплат  $Zn_{12}$ -икосаэдр (а), двухслойный нанокластер  $K44 = 0@Zn_{12}@32(Mg_{20}Zn_{12})$  (б).

**Самосборка слоя.** Образование микрослоя  $S_3^2$  происходит при связывании параллельно расположенных первичных цепей  $S_3^1$  в плоскости (001) (рис. 5). Расстояние между центрами супракластеров из соседних цепей в направлениях [100] и [010] соответствует длинам векторов  $a = b = 13.709 \text{ \AA}$ . На этой стадии в пустотах микрослоя происходит локализация кластеров K30 и связывание димеров  $Zn_2$  с атомами Zr.

**Самосборка каркаса.** Микрокаркас структуры  $S_3^3$  формируется при связывании двух микрослоев в направлении [001]. Расстояние между микрослоями определяет длину вектора трансляции  $c = 13.709 \text{ \AA}$ .

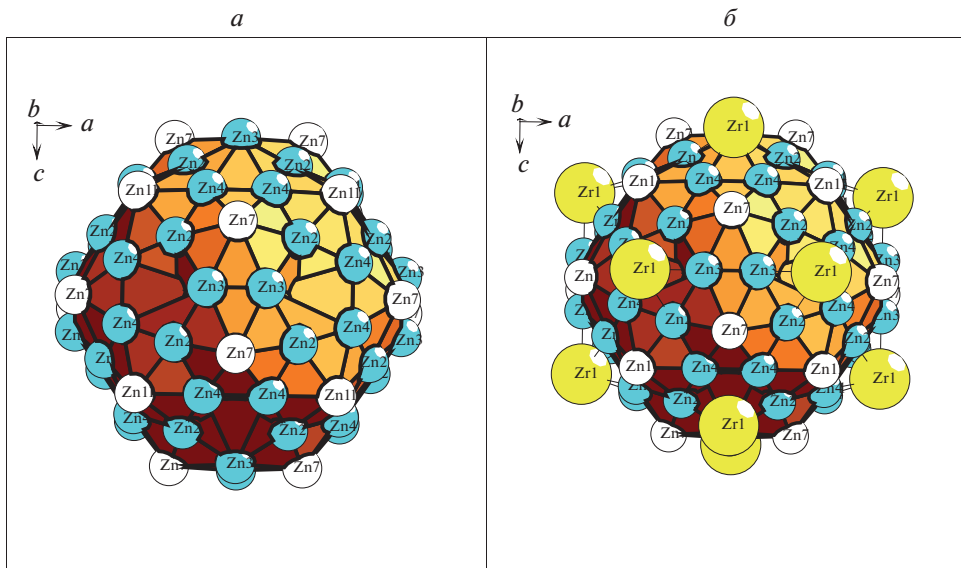


Рис. 3.  $Zr_6Mg_{20}Zn_{128}$ . Третья оболочка из 60 атомов Zn (типа фуллерена  $C_{60}$ ) и атомы Zn7 и Zn11, занимающие позиции над 6-атомными кольцами в оболочке (а), атомы Zr, занимающие позиции над 5- атомными кольцами в оболочке (б).

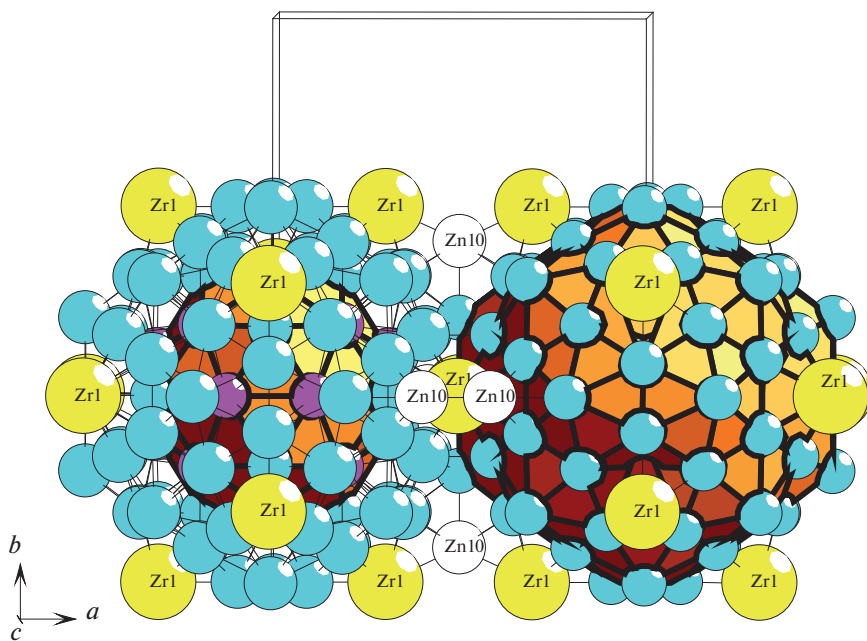


Рис. 4.  $Zr_6Mg_{20}Zn_{128}$ . Механизм комплементарного связывания нанокластеров K136 с участием атомов Zn10 при образовании первичной цепи.

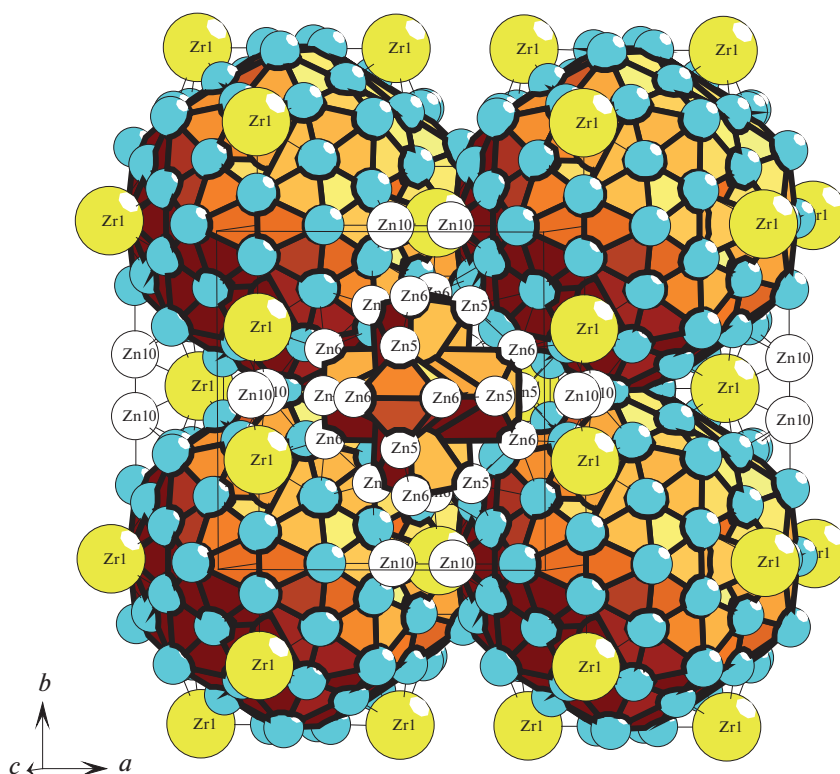


Рис. 5.  $Zr_6Mg_{20}Zn_{128}$ . Микрослой, образованный из нанокластеров K136. Показано расположение кластеров K30 и димеров  $Zn_2$  (белые атомы).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Самосборка каркасной структуры интерметаллида  $Zr_6Mg_{20}Zn_{128}$  осуществляется с участием трехслойного нанокластера  $K136 = 0@Zn_{12}@32(Mg_{20}Zn_{12}@92(Zr_{12}Zn_{80}))$  и двухслойного нанокластера  $K30 = 0@Zn_6@Zn_{24}$  с внутренним  $Zn_6$ -октаэдром и с 24 атомами Zn в оболочке. В качестве спейсеров, занимающих пустоты в 3D каркасе, установлены димеры  $Zn_2$ . Реконструирован симметричный и топологический код процессов самосборки 3D структур из нанокластеров-прекурсоров K136 и K30 в виде: первичная цепь  $\rightarrow$  микрослой  $\rightarrow$  микрокаркас.

Нанокластерный анализ выполнен при поддержке Российского научного фонда (РНФ № 20-13-00054), анализ самосборки кристаллической структуры выполнен при поддержке Минобрнауки РФ в рамках выполнения работ по государственному заданию ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН, топологический анализ выполнен при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания № 0778-2020-0005.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Inorganic crystal structure database (ICSD). Fachinformationszentrum Karlsruhe (FIZ), Germany and US National Institute of Standard and Technology (NIST), USA.

2. Villars P., Cenzual K. Pearson's Crystal Data-Crystal Structure Database for Inorganic Compounds (PCDIC) ASM International: Materials Park, OH.
3. Li M.-R., Deng D.-W., Kuo K.-H. Crystal structure of the hexagonal  $(\text{Zn}, \text{Mg})_4 \text{Ho}$  and  $(\text{Zn}, \text{Mg})_4 // \text{Er}$ . *J. Alloys Compd.* 2006. V. 414. P. 66–72.
4. Gomez C.P., Ohhashi S., Yamamoto A., Tsai A.P. Disordered structures of the TM–Mg–Zn 1/1 quasicrystal approximants (TM = Hf, Zr, or Ti) and chemical intergrowth // *Inorg. Chem.* 2008. V. 47. P. 8258–8266.
5. Lin Qisheng, Corbett J.D. The 1/1 and 2/1 approximants in the Sc–Mg–Zn quasicrystal system: Tricapped clusters as fundamental building blocks // *J. Am. Chem. Soc.* 2006. V. 128. P. 13268–273.
6. Berthold Rico, Kreiner Guido, Burkhardt Ulrich et al. Crystal structure and phase stability of the phi phase in the Al–Mg–Zn system // *Intermetallics*. 2013. V. 32. P. 259–273.
7. Bruehne S., Uhrig E., Gross C., Assmus W. Local 3D real space atomic structure of the simple icosahedral  $\text{Ho}_{11}\text{Mg}_{15}\text{Zn}_{74}$  quasicrystal from PDF data // *Cryst. Res. Technol.* 2003. V. 38. P. 1023–1036.
8. Bergman G., Waugh J.L.T., Pauling L. The crystal structure of the metallic phase  $\text{Mg}_{32}(\text{Al}, \text{Zn})_{49}$  Al–Zn–Mg alloys // *Acta Crystallographica*. 1957. V. 10. P. 254–259.
9. Montagne Pierre, Tillard Monique. On the adaptability of 1/1 cubic approximant structure in the Mg–Al–Zn system with the particular example of  $\text{Mg}_{32}\text{Al}_{12}\text{Zn}_{37} // \text{J. Alloys Compd.}$  2016. V. 656. P. 159–165.
10. Egusa D., Abe E. The structure of long period stacking/order Mg–Zn–RE phases with extended non-stoichiometry ranges // *Acta Mater.* 2012. V. 60. P. 166–178.
11. Kishida Kyosuke, Nagai Kaito, Matsumoto Akihide. Crystal structures of highly-ordered long-period stacking-ordered phases with 18R, 14H and 10H-type stacking sequences in the Mg–Zn–Y system // *Acta Mater.* 2015. V. 99. P. 228–239.
12. Abe E., Takakura H., Singh A., Tsai A.P. Hexagonal superstructures in the Zn–Mg–rare-earth alloys // *J. Alloys Compd.* 1999. V. 283. P. 169–172.
13. Blatov V.A., Shevchenko A.P., Proserpio D.M. Applied Topological Analysis of Crystal Structures with the Program Package ToposPro. // *Cryst. Growth Des.* 2014. V. 14. № 7. P. 3576–3585. <https://topospro.com/>
14. Илюшин Г.Д. Моделирование процессов самоорганизации в кристаллообразующих системах. М.: Едиториал УРСС. 2003. 376 с.
15. Ilyushin G.D. Theory of cluster self-organization of crystal-forming systems. Geometrical-topological modeling of nanocluster precursors with a hierarchical structure // *Struct. Chem.* 2012. V. 20. № 6. P. 975–1043.
16. Pankova A.A., Blatov V.A., Ilyushin G.D., Proserpio D.M.  $\gamma$ -Brass Polyhedral Core in Intermetallics: The Nanocluster Model // *Inorg. Chem.* 2013. V. 52. № 22. P. 13094–13107.
17. Шевченко В.Я., Блатов В.А., Илюшин Г.Д. Кластерная самоорганизация интерметаллических систем: 108-атомный трехслойный икосаэдрический кластер  $0@12(\text{Ga}_{12})@24(\text{Na}_{12}\text{Ga}_{12})@72(\text{Rb}_4\text{Na}_8\text{Ga}_{60})$  и 44-атомный двухслойный икосаэдрический кластер  $0@12(\text{Ga}_{12})@32(\text{Na}_{20}\text{Ga}_{12})$  для самосборки кристаллической структуры  $\text{Rb}_{24}\text{Na}_{200}\text{Ga}_{696}\text{-oF920} // \text{Физика и химия стекла.}$  2019. Т. 45. № 3. С. 203–214.
18. Шевченко В.Я., Блатов В.А., Илюшин Г.Д. Кластерная самоорганизация интерметаллических систем. Новый кластер-прекурсор  $(\text{InNa}_5)(\text{AuAu}_5)$  и первичная цепь с симметрией 5m для самосборки кристаллической структуры  $\text{Na}_{32}\text{Au}_{44}\text{In}_{24}\text{-oP100} // \text{Физика и химия стекла.}$  2019. Т. 45. № 4. С. 303–310.
19. Шевченко В.Я., Блатов В.А., Илюшин Г.Д. Моделирование процессов самоорганизации в кристаллообразующих системах. Новые двухслойные кластеры-прекурсоры  $0@(\text{Na}_2\text{Cd}_6)@(\text{Na}_{12}\text{Cd}_{26})$  и  $0@(\text{Na}_3\text{Cd}_6)@(\text{Na}_6\text{Cd}_{35})$  для самосборки кристаллической структуры  $\text{Na}_{26}\text{Cd}_{141}\text{-hP168} // \text{Физика и химия стекла.}$  2019. Т. 45. № 5. С. 403–411.
20. Shevchenko V.Ya., Medrish I.V., Ilyushin G.D., Blatov V.A. From clusters to crystals: scale chemistry of intermetallics // *Struct. Chem.* 2019. V. 30. № 6. P. 2015–2027.
21. Шевченко В.Я., Блатов В.А., Илюшин Г.Д. Моделирование процессов самоорганизации в кристаллообразующих системах. Кластеры-прекурсоры для самосборки кристаллической структуры  $\text{Na}_{99}\text{Hg}_{468}\text{-hP56} // \text{Физика и химия стекла.}$  2019. Т. 45. № 6. С. 503–509.
22. Шевченко В.Я., Блатов В.А., Илюшин Г.Д. Моделирование процессов самоорганизации в кристаллообразующих системах. Новый двухслойный кластер-прекурсор  $\text{K44} = 0@8(\text{Na}_2\text{In}_6)@36(\text{In}_6\text{Cd}_6\text{K}_6)_2$  для самосборки кристаллической структуры  $\text{K}_{23}\text{Na}_8\text{Cd}_{12}\text{In}_{48}\text{-hP91} // \text{Физика и химия стекла.}$  2019. Т. 45. № 6. С. 510–518.