ФИЗИКА И ХИМИЯ СТЕКЛА **2023, том 49, № 3, с. 223–234**

КЛАСТЕРНАЯ САМООРГАНИЗАЦИЯ ИНТЕРМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ: КЛАСТЕРЫ-ПРЕКУРСОРЫ *K*3, *K*4, *K*5, *K*7, *K*8 ДЛЯ САМОСБОРКИ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУР $Lu_{66}Te_{24}$-*mC*90, Te_4Lu_{28}-*oC*32, $Lu_3(TeLu_3)Lu_2$-*hP*9 И Lu_4Te_4-*cF*8

© 2023 г. В. Я. Шевченко[1, *], Г. Д. Илюшин[2, **]

[1]*Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН, наб. Макарова, 2, Санкт-Петербург, 199034 Россия*

[2]*Научно-исследовательский центр "Кристаллография и фотоника", Ленинский пр., 59, Москва, 119333 Россия*

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

******e-mail: gdilyushin@gmail.com*

Поступила в редакцию 19.12.2022 г.
После доработки 01.02.2023 г.
Принята к публикации 08.02.2023 г.

С помощью компьютерных методов (пакет программ ToposPro) осуществлен комбинаторно-топологический анализ и моделирование самосборки кристаллических структур Lu_4Te_4-*oF*8 (*Fm*-3*m*, *V* = 211.0 Å^3), Te_4Lu_{28}-*oC*32 (*Cmcm*, *V* = 908.3 Å^3), $Lu_3(TeLu_3)Lu_2$-*hP*9 (*P*-62*m*, *V* = 908.3 Å^3), $Lu_{66}Te_{24}$-*mC*90 (*C*12/*m*1, *V* = 2467.2 Å^3). Для кристаллической структуры Lu_4Te_4-*oF*8 установлены кластеры-прекурсоры *K*8 = 0@Te_4Lu_4 с симметрией -43*m*, для Te_4Lu_{28}-*oC*32 – тетраэдрические кластеры-прекурсоры *K*4 = 0@Lu_4 и *K*4 = 0@$TeLu_3$ с симметрией 2 и *m*, для $Lu_3(TeLu_3)Lu_2$ – кластеры-прекурсоры *K*7 = = 0@$Lu_3(TeLu_3)$ с симметрией 3*m* и спейсеры Lu. Для кристаллической структуры $Lu_{66}Te_{24}$-*mC*90 установлены кластеры-прекурсоры в виде пирамиды *K*5 = 0@Lu_5 с симметрией 2, тетраэдры *K*4 = 0@Lu_4 с симметрией 2, тетраэдры *K*4 = 0@$TeLu_3$ и тетраэдры *K*4 = 0@Te_2Lu_2, и кольца *K*3 = 0@$TeLu_2$, участвуют в образование супракластеров-тримеров. Реконструирован симметрийный и топологический код процессов самосборки 3D структур из кластеров-прекурсоров в виде: первичная цепь → → слой → каркас.

Ключевые слова: интерметаллиды Lu_4Te_4-*oF*8, Te_4Lu_{28}-*oC*32, $Lu_3(TeLu_3)Lu_2$-*hP*9 и $Lu_{66}Te_{24}$-*mC*90, самосборка кристаллической структуры, кластеры-прекурсоры *K*3, *K*4, *K*5, *K*7, *K*8

DOI: 10.31857/S0132665122600947, **EDN:** SLCWBB

ВВЕДЕНИЕ

В двойных системах *A*–*T* (*T* = Se, Te) установлено образование 623 селенидов и 614 теллуридов A_xT_y с атомами *A* = Sc, Y, Zr, U, Ti, V, Cr, Fe, Co, Ni, Cu, лантанидами *Ln* = La–Lu [1, 2]. Наиболее многочисленным является кристаллохимическое семейство A_2T_2-*cF*8 с пр. группой *Fm*-3*m*, насчитывающее 36 селенидов и 37 теллуридов.

В системе Lu–Te (табл.1) интерметаллиды $LuTe_3$-*oC*16 [3], $LuTe_2$-*tP*6 [3], Lu_2Te_3-*oF*80 [4] и Lu_4Te_4-*cF*8 [5] имеют кристаллохимических аналогов среди интерметаллидов Sc_xTe_y (табл. 2, [9–14]) и интерметаллидов Y_xTe_y (табл. 3, [15–17]) и среди других интерметаллидов с большими атомами *A*.

Таблица 1. Система Lu–Te. Кристаллографические данные

Соединение	Группа симметрии	Параметры элементарной ячейки в Å, угол в градусах	V, Å^3
$LuTe_3$-*oC*16 [3]	*Cmcm*	4.277, 25.137, 4.278	459.9
$LuTe_2$-*tP*6 [3]	*P*4/*nmm*	4.222, 4.222, 8.807	157.0
Lu_2Te_3-*oF*80 [4]	*Fddd*	12.022, 8.499, 25.497	2605.2
Lu_4Te_4-*cF*8 [5]	*Fm*-3*m*	5.953, 5.953, 5.953	211.0
Lu_8Te-*hP*9 [6]	*P*-62*m*	9.000, 9.000, 3.687	258.6
Te_4Lu_{28}-*oC*32 [6]	*Cmcm*	3.742, 12.278, 19.770	908.3
$Lu_{66}Te_{24}$-*mC*90 [7]	*C*12/*m*1	30.412, 3.950, 21.073, 102.96	2467.2
Lu-*cI*2 [8]	*Im*-3*m*	3.900, 3.900, 3.900	59.32

Таблица 2. Система Sc–Te. Кристаллографические данные

Соединение	Группа симметрии	Параметры элементарной ячейки в Å, угол в градусах	V, Å^3
Sc_2Te_3-*oF*80 [10]	*Fddd*	8.222, 11.629, 24.608	2353.0
Sc_4Te_4-*cF*8 [1]	*Fm*-3*m*	5.817, 5.817, 5.817	196.8
ScTe-*hP*4 [1]	$P6_3/mmc$	4.130, 4.130, 6.749	99.7
ScTe-*hP*8 [11]	$P6_3/mmc$	4.097, 4.097, 13.602	197.7
Sc_2Te-*oP*36 [12]	*Pnma*	20.178, 3.919, 10.675	844.1
Sc_8Te_3-*mC*88 [13]	*C*12/*m*1	28.842, 3.852, 22.352, 122.51	2094.0
Sc_9Te_2-*oC*88 [14]	$Cmc2_1$	7.758, 15.654, 17.283	2098.8

Три кристаллические структуры Te_4Lu_{28}-*oC*32 ($TeLu_7$, *Cmcm*, V = 908.3 Å^3) [6], $Lu_3(TeLu_3)Lu_2$-*hP*9 ($TeLu_8$, *P*-62*m*, V = 908.3 Å^3) [6], $Lu_{66}Te_{24}$-*mC*90 ($Lu_{11}Te_4$, *C*12/*m*1, V = 2467.2 Å^3) [7] не имеют кристаллохимических аналогов.

Кристаллические структуры $TeLu_7$-*oC*32 и $TeLu_8$-*hP*9 рассмотрены в [6] как новые варианты замещения атомов в металлическом лютеции Lu [8].

Кристаллическая структура $Lu_{66}Te_{24}$-*mC*90 в [7] интерпретирована как слоистая и проведено ее сравнение со слоистыми структурами Sc_8Te_3-*mC*88 [13] и $Ti_{11}Se_4$-*mS*90 [18].

В настоящей работе проведен геометрический и топологический анализ кристаллических структур Lu_2Te_2-*cF*8, $TeLu_7$-*oC*32, $TeLu_8$-*hP*9, $Lu_{66}Te_{24}$-*mC*90. Установлены кластеры-прекурсоры *K*3, *K*4, *K*5, *K*7, *K*8 участвующие в самосборке кристаллических

Таблица 3. Система Y–Te. Кристаллографические данные

Соединение	Группа симметрии	Параметры элементарной ячейки в Å	V, Å^3
YTe_3-*oC*16 [15]	*Cmcm*	4.303,25.490,4.303	472.0
YTe_2-*tP*6 [3]	*P*4/*nmm*	4.291,4.291,8.912	164.1
Y_2Te_3-*oF*80 [4]	*Fddd*	12.228,8.645,25.935	2741.6
YTe-*cF*8 [16]	*Fm*-3*m*	6.095,6.095,6.095	226.4
Y_7Te_2-*oP*36 [17]	*Pnma*	21.328,4.056,11.401	986.3

Таблица 4. Lu_4Te_4-*cF*8. Координационные последовательности и локальное окружение атомов в кристаллической структуре

Атом	Локальное окружение	Координационные последовательности
		N1 N2 N3 N4 N5
Te1	6 Lu	6 50 138 296 404
Lu1	6Te + 12Lu	18 74 170 306 482

Таблица 5. Te_4Lu_{28}-*oC*32. Координационные последовательности и локальное окружение атомов в кристаллической структуре

Атом	Локальное окружение	Координационные последовательности
		N1 N2 N3 N4 N5
Te1	2Te + 9Lu	11 42 93 176 279
Lu1	1Te + 11Lu	12 45 105 183 291
Lu2	2Te + 11Lu	13 46 102 182 287
Lu3	12Lu	12 47 103 185 290
Lu4	3Te +Lu1	13 46 99 188 2 89

структур. Реконструирован симметрийный и топологический код процессов самосборки 3D структур из кластеров-прекурсоров в виде: первичная цепь → слой → каркас.

Работа продолжает исследования [19–23] в области моделирования процессов самоорганизации систем на супраполиэдрическом уровне и геометрического и топологического анализа кристаллических структур с применением современных компьютерных методов.

МЕТОДИКИ, ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ПРИ КОМПЬЮТЕРНОМ АНАЛИЗЕ

Геометрический и топологический анализ осуществляли с помощью комплекса программ ToposPro [24], позволяющего проводить многоцелевое исследование кристаллической структуры в автоматическом режиме, используя представление структур в виде 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 атомов в k-ой координационной сфере данного атома. Полученные значения координационных последовательностей атомов для Lu_4Te_4-*cF*8, Te_4Lu_{28}-*oC*32, $Lu_3(TeLu_3)Lu_2$-*hP*9, $Lu_{66}Te_{24}$-*mC*90, приведены в табл. 4–7.

Алгоритм разложения в автоматическом режиме структуры любого интерметаллида, представленного в виде свернутого графа, на кластерные единицы основывается на следующих принципах: структура образуется в результате самосборки из нанокластеров-прекурсоров образующих каркас структуры, пустоты в котором заполняют спейсеры; кластеры-прекурсоры занимают высокосимметричные позиции; набор нанокластеров-прекурсоров и спейсеров включает в себя все атомы структуры.

СИММЕТРИЙНЫЙ И ТОПОЛОГИЧЕСКИЙ КОД (ПРОГРАММА) САМОСБОРКИ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУР

Использованный нами метод моделирования кристаллической структуры основан на определении иерархической последовательности ее самосборки в кристаллографи-

Таблица 6. $TeLu_8$-*hP*9. Координационные последовательности и локальное окружение атомов в кристаллической структуре

Атом	Локальное окружение	Координационные последовательности
		N1 N2 N3 N4 N5
Te1	2Te + 9Lu	11 41 110 191 305
Lu1	2Te + 12Lu	14 50 114 198 314
Lu2	1Te + 12Lu	13 49 112 201 311
Lu3	11Lu	11 47 104 197 311

Таблица 7. $Lu_{66}Te_{24}$-*mC*90. Координационные последовательности и локальное окружение атомов в кристаллической структуре

Атом	Локальное окружение	Координационные последовательности
		N1 N2 N3 N4 N5
Te1	4Te + 8Lu	12 47 107 200 316
Te2	2Te + 9Lu	11 47 106 197 319
Te3	4Te + 7Lu	11 46 108 200 320
Te4	5Te + 7Lu7	12 45 114 200 331
Te5	3Te + 9Lu	12 46 109 210 336
Te6	4Te + 8Lu	12 44 106 201 317
Lu1	4Te + 10Lu	14 52 116 207 337
Lu2	3Te + 10Lu	13 51 111 207 338
Lu3	5Te + 12Lu	17 55 119 212 336
Lu4	3Te + 11Lu	14 51 117 209 339
Lu5	4Te + 11Lu	15 55 118 207 342
Lu6	2Te + 12 Lu	14 57 123 227 348
Lu7	1Te + 13Lu	14 53 130 238 356
Lu8	4Te + 10 Lu	14 50 121 216 340
Lu9	4Te + 10 Lu	14 50 118 209 337
Lu10	4Te + 9Lu	13 54 122 219 347
Lu11	2Te + 12Lu	14 54 118 215 331
Lu12	3Te + 11Lu	14 53 118 214 339
Lu13	2Te + 12Lu	14 51 117 208 336
Lu14	1Te + 13Lu	14 50 119 217 343
Lu15	4Te + 11Lu	15 51 118 216 340
Lu16	2Te + 12Lu	14 52 114 208 335
Lu17	14Lu	14 52 112 204 328

ческом пространстве. На первом уровне самоорганизации системы определяется механизм формирования первичной цепи структуры из нанокластеров 0-уровня, сформированных на темплатной стадии химической эволюции системы, далее – механизм самосборки из цепи слоя (2-ой уровень) и затем из слоя – трехмерного каркаса структуры (3-й уровень).

Кристаллическая структура Lu_4Te_4-oF8

Пространственная группа *Fm*-3*m* (no. 225) характеризуется набором элементов с точечной симметрией $g = m\text{-}3m$, -43*m*, *mmm* и др. Индекс Пирсона соответствует *cF*8, т.е. в элементарной ячейке находится 8-ми атомный кластер *K*8. Атомы Lu и Te занимают позиции 4*a* (0, 0, 0) и 4*b* (1/2, 1/2, 1/2) с симметрией *m*-3*m*.

Кластер-прекурсор $K8 = 0@Te_4(Lu_4)$ представляет собой тетраэдр Lu_4 на гранях которого находятся атомы Te (рис. 1). Длины связей атомов Lu–Lu в тетраэдре 4.209 Å и Lu–Te = 3 × 2.977 Å (рис. 1). В локальном окружении атома Te находятся 6 атомов Lu, атома Lu – 12 атомов Lu и 6Te (табл. 5).

В элементарной ячейке Lu_4Te_4-*oF*8 находится один атомный кластер *K*8. Центр кластера расположен в позиции 8*c* (1/4, 1/4, 3/4) с симметрией -43*m*.

Первичная цепь S_3^1. Первичная цепь S_3^1 формируется в результате связывания кластеров-прекурсоров *K*8 + *K*8 с индексом связности $P_c = 8$.

Самосборка слоя S_3^2. Образование микрослоя $S_3^2 = S_3^1 + S_3^1$ происходит связыванием параллельно расположенных цепей. При связывании первичных цепей индекс связности $P_c = 8 + 8 + 2$ (рис. 1).

Самосборка каркаса S_3^3. Микрокаркас структуры S_3^3 формируется при упаковке (без сдвига) микрослоев. Расстояние между микрослоями соответствует значению параметра кубической ячейки.

Кристаллическая структура Te_4Lu_{28}-oC32

В элементарной ячейке Te_4Lu_{28} находятся 32 атома. В локальном окружении атома Te находятся 11 атомов (2Te + 9Lu), атома Lu1 находятся 12 атомов (1Te + 11Lu), атома Lu2 находятся 13 (2Te + 11Lu) , атома Lu3 – 12 Lu, атома Lu4 – 3Te + 10Lu (табл. 5). Длины связей атомов в кристаллической структуре приведены на рис. 2, 3.

Рассматривается вариант самосборки кристаллической структуры из образующих упаковки 4-атомных тетраэдрических кластеров-прекурсоров $K4(2) = 0@Lu_4$ и $K4(m) = 0@TeLu_3$ с симметрией 2 и *m* (рис.2).

Первичная цепь S_3^1. Самосборка первичных цепей из кластеров *K*4(2) и *K*4(m) происходит в направлении кратчайшей оси *a* с индексом связанности кластеров $P_c = 8$ (равному числу связей: 1 Te–Te + 7 Lu–Lu) и 8 Lu–Lu (рис. 3). Расстояние между центрами кластеров *K*4(2) и *K*4(*m*) соответствует значению вектора трансляции $a = 3.742$ Å.

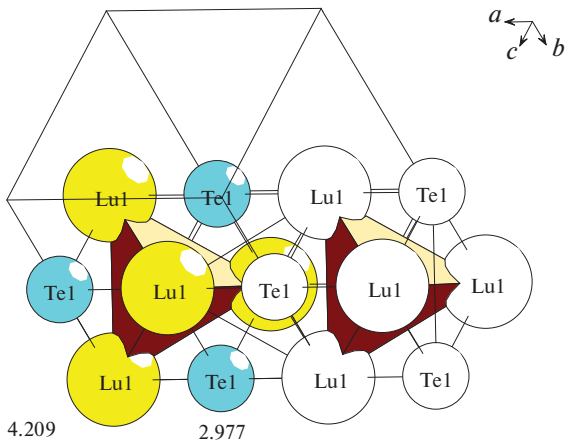
Самосборка слоя S_3^2. Образование микрослоя S_3^2 происходит при связывании первичных цепей в плоскости элементами симметрии $g = -1$.

Самосборка каркаса S_3^3. Микрокаркас структуры формируется при связывании двух микрослоев S_3^2 в направлении оси *X* (рис. 3).

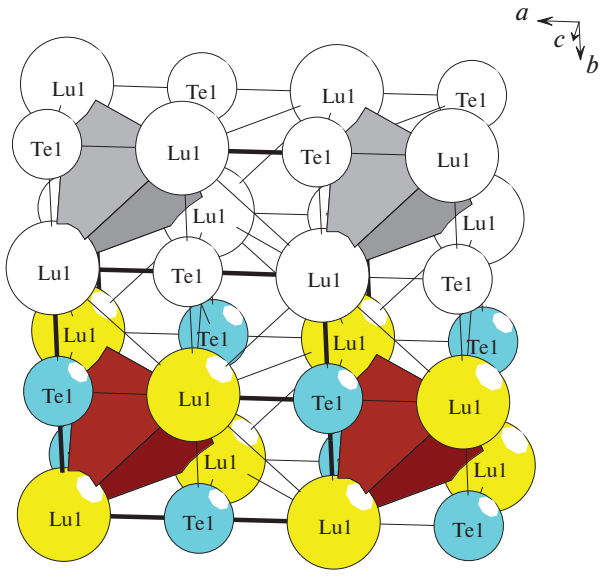
Кристаллическая структура $Lu_3(TeLu_3)$ Lu_2-hP9

В элементарной ячейке $Lu_3(TeLu_3)Lu_2$ находятся 9 атомов. В локальном окружении атома Te находятся 11 атомов (2Te + 9Lu), атома Lu1 находятся 15 атомов (2Te + 10Lu), атома Lu2 – 13 (1Te + 12Lu), атома Lu3 – 11Lu (табл. 6). Длины связей атомов в кристаллической структуре приведены на рис. 4.

Рассматривается вариант самосборки кристаллической структуры из образующих упаковки 7-атомных кластеров-прекурсоров $K7 = 0Lu_3(TeLu_3)$ с участием атомов-спейсеров Lu2 (рис. 4).



S_3^1



$S_3^2 = S_3^1 + S_3^1$

Рис. 1. Кристаллическая структура Te_4Lu_4-*cF*8.

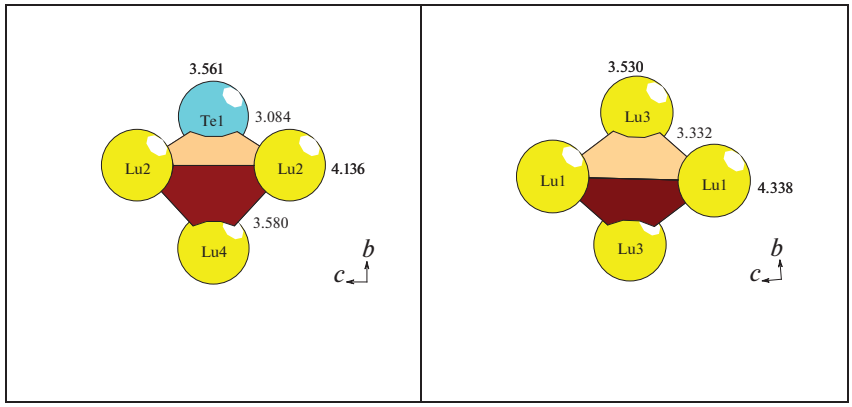


Рис. 2. Кристаллическая структура Lu7Te-*oC*32.

Кластер-прекурсор. Центр кластера-прекурсора *K*7 находится в частной позиции 2e (0, 0, 1/8) с симметрией $g = 3m$ (рис. 4). На трех гранях тетраэдра $TeLu_3$ расположены большие атомы Lu2 (с КЧ = 15), образующие связи с атомом Te и двумя атомами Lu1. Атомы-спейсеры Lu3 связаны с атомами Lu1 и Lu2.

Первичная цепь S_3^1. Самосборка первичных цепей из кластеров *K*7 происходит в направлении кратчайшей оси *Z* с индексом связанности кластеров $P_c = 9$ (рис. 4). Атомы-спейсеры Lu3, расположенные между кластерами *K*7, увеличивают индекс связанности кластеров P_c до 9 + 4 = 13 (рис. 4). Расстояние между центрами кластеров *K*7 соответствует значению вектора трансляции $c = 3.687$ Å.

Самосборка слоя S_3^2. Образование микрослоя происходит при связывании первичных цепей в плоскости *XZ* (рис. 4). Расстояние между центрами кластеров *K*7 из соседних цепей в направлении осей *X* соответствует значению вектора трансляции $a = 9.000$ Å.

Самосборка каркаса S_3^3. Микрокаркас структуры формируется при связывании двух микрослоев S_3^2 (рис. 4). Многократная 3D-конденсация микрокаркаса из восьми кластеров-прекурсоров приводит к самосборке макрокристаллической структуры.

Кристаллическая структура $Lu_{66}Te_{24}$-mC90

Пространственная группа *C*12/*m*1(№ 12) с симметрией частных позиций 2/*m* (2a,2b,2c,2d), -1 (4e, 4f), 2 (4g,4h), *m* (4i).

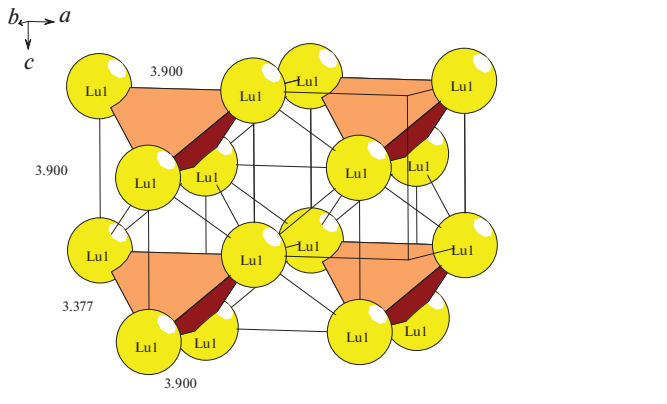
В элементарной ячейке $Lu_{66}Te_{24}$-*mC*90 находятся 90 атомов.

Установлены значения КЧ атомов Te равные 11 (2 атома) и 12 (4 атома), и КЧ атомов Lu равные 13 (2 атома), 14 (12 атомов), 15 (2 атома), 17 (1 атом) (табл. 7).

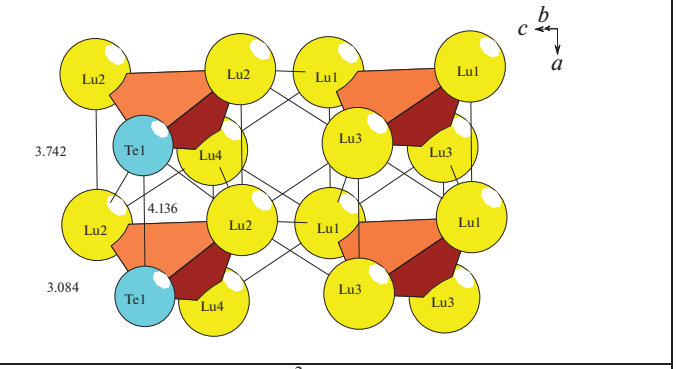
Из 23 кристаллографически независимых атомов, только атом Lu17 занимает позицию 2a (0,0,0) с симметрией 2/*m*, все остальные – 16 атомов Lu и 6 атомов Te находятся в плоскостях *m* в позиции 4i (*x*, 0, *z*).

Определены 7 кристаллографически независимых полиэдров в виде пирамиды *K*5(2) = 0@Lu_5 с симметрией 2, тетраэдра *K*4(2) = 0@Lu_4 с симметрией 2, тетраэдра *K*4-1 = = 0@$TeLu_3$, тетраэдра *K*4-2 = 0@$TeLu_3$, тетраэдра *K*4-3 = 0@Te_2Lu_2, тройных колец *K*3-1 = = @TeLu2 и *K*3-2 = @TeLu2 (рис. 5).

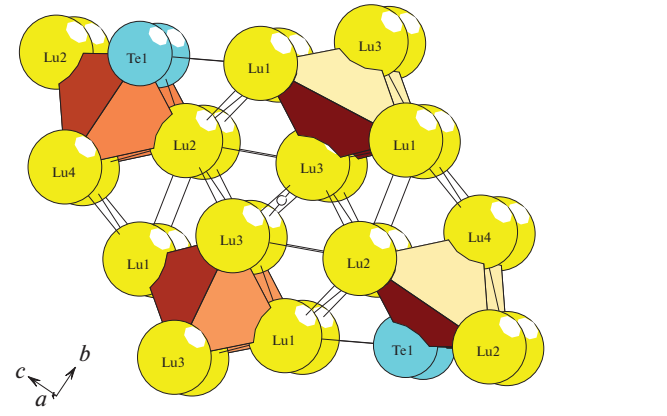
Выделены супраполиэдрические кластеры – тримеры – образованные из трех кластеров (рис. 5):



S_3^2



S_3^2



$S_3^3 = S_3^2 + S_3^2$

Рис. 3. Кристаллическая структура Lu7Te-*oC*32 и Lu-*cI*2.

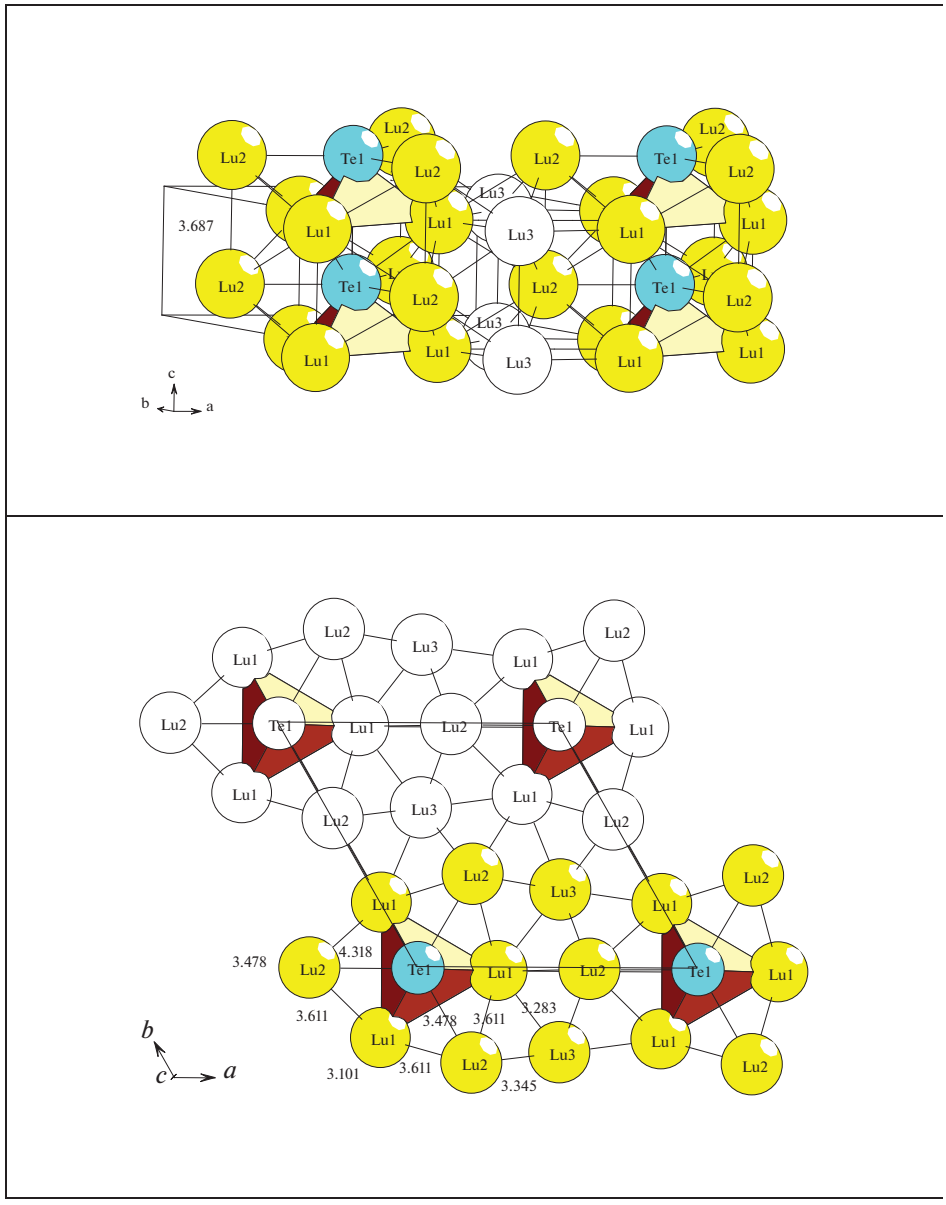


Рис. 4. Кристаллическая структура $Lu_3(TeLu_3)P_2$-*hP*9. Слой (сверху) и каркас (снизу).

SSU-1 = пирамида $0@Lu_5$ + 2 кольца $@TeLu_2$,

SSU-2 = тетраэдр $0@Lu_4$ + 2 кольца $@TeLu_2$,

SSU-3 = 2 тетраэдра $0@TeLu_3$ + тетраэдр $0@Te_2Lu_2$

SSU-4 = 2 тетраэдра $0@TeLu_3$ + тетраэдр $0@Te_2Lu_2$.

Самосборка слоя S_3^2. Образование микрослоя происходит при связывании тримеров в плоскости *XZ* (рис. 5). Удвоенное расстояние между центром пирамиды $0@Lu_5$ и

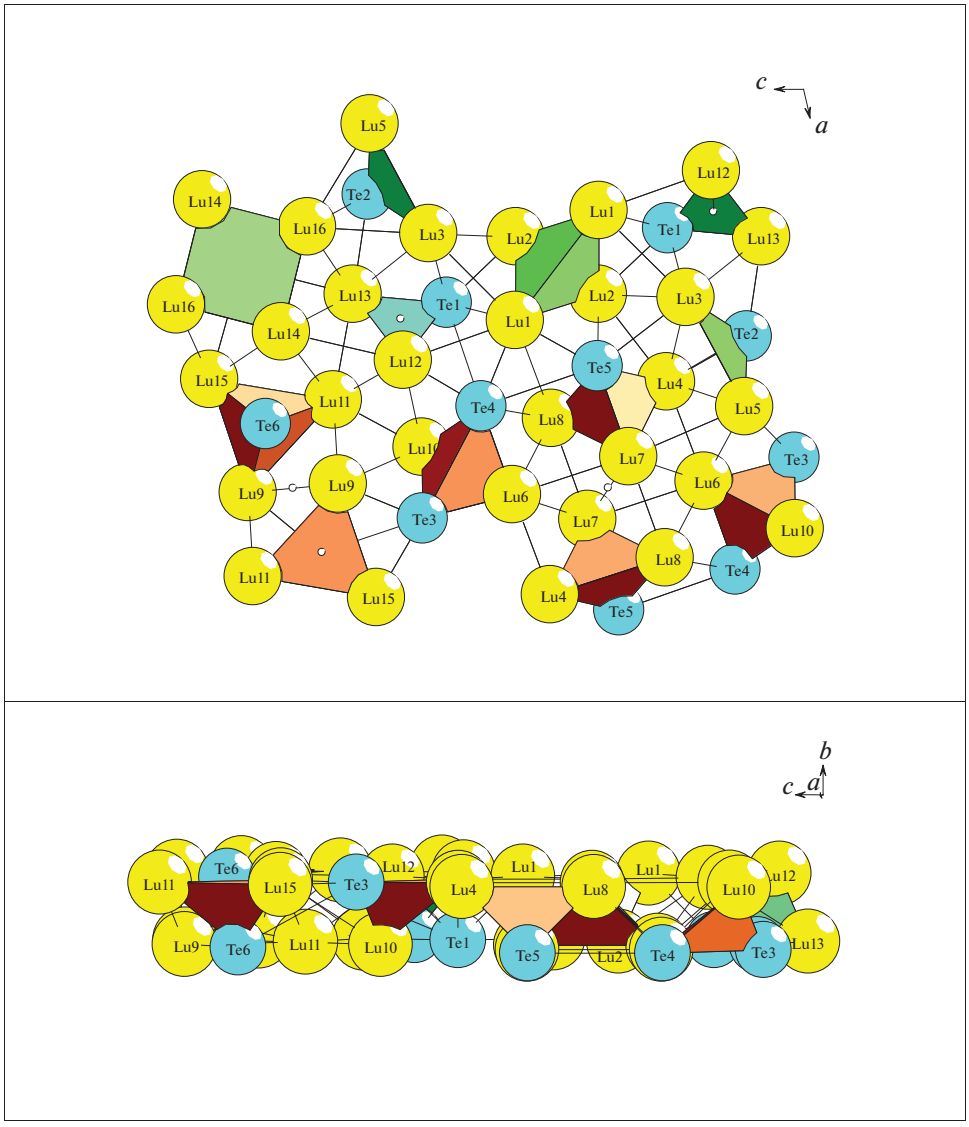


Рис. 5. Кристаллическая структура $Lu_{66}Te_{24}$-*mC*90. Слой.

центром тетраэдра $0@Lu_4$ в направлении оси *Z* соответствует значению вектора трансляции $c = 21.073$ Å.

Самосборка каркаса S_3^3. Микрокаркас структуры формируется при связывании двух микрослоев S_3^2 в направлении оси *Y*. Расстояние между слоями соответствует значению вектора трансляции $b = 3.950$ Å.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Осуществлен комбинаторно-топологический анализ и моделирование самосборки кристаллических структур Lu_4Te_4-*cF*8, $TeLu_7$-*oC*32 и $TeLu_8$-*hP*9 $Lu_{66}Te_{24}$-*mC*90. Для

кристаллической структуры Lu_4Te_4-*oF*8 установлены тетраэдрические кластеры-прекурсоры $K4 = 0@Te_2Lu_2$ с симметрией -43*m*, для Te_4Lu_{28}-*oC*32 – кластеры-прекурсоры $K4 = 0@Lu_4$ и $K4 = 0@TeLu_3$ с симметрией 2 и *m*, для кристаллической структуры $Lu_3(TeLu_3)Lu_2$ – кластеры-прекурсоры $K7 = 0@Lu_3(TeLu_3)$ с симметрией 3*m* и атомы-спейсеры Lu. Для кристаллической структуры $Lu_{66}Te_{24}$-*mC*90 установлены кластеры-прекурсоры в виде пирамиды $K5 = 0@Lu_5$ с симметрией 2, тетраэдры $K4 = 0@Lu_4$ с симметрией 2, тетраэдры $K4 = 0@TeLu_3$ и тетраэдры $K4 = 0@Te_2Lu_2$, и кольца $K3 = @TeLu_2$, участвующие в образование супракластеров-тримеров. Реконструирован симметрийный и топологический код процессов самосборки 3D структур из кластеров-прекурсоров в виде: первичная цепь → слой → каркас.

Анализ самосборки кристаллических структур выполнен при поддержке Минобрнауки РФ в рамках выполнения работ по государственному заданию ФНИЦ "Кристаллография и фотоника" РАН, кластерный анализ выполнен при поддержке Российского научного фонда (РНФ № 21-73-30019).

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. *Cannon J.F., Hall H.T.* High-pressure, high-temperature syntheses of selected lanthanide-tellurium compounds // Inorganic Chemistry. 1970. V. 9. P. 1639–1643.
4. *Flahaut Jean, Laruelle Pierre, Pardo Marie Paule, Guittard Micheline.* Les sulfures, seleniures et tellurures L2X3 de terres rares, d'yttrium et descandium orthorhombiques du type Sc2S3 // Bulletin de la Societe Chimique de France. 1965. V. 1965. P. 1399–1404.
5. *Hulliger F., Hull G.W.Jr.* Superconductivity in rocksalt-type compounds // Solid State Communications. 1970. V. 8. P. 1379–1382.
6. *Chen Ling, Corbett J.D.* Lu8 Te and Lu7 Te. Novel substitutional derivatives of lutetium metal // J. Am. Chem. Soc. 2003. V. 125. P. 7794–7795.
7. *Chen Ling, Xia Shengqing, Corbett J.D.* Metal-rich chalcogenides. Synthesis, structure and bonding of the layered Lu11Te4. Comparison with the similar Sc8Te3 and Ti11Se4 // Inorg. Chem. 2005. V. 44. P. 3057–3062.
8. *Miller A.E., Daane A.H.* The High-Temperature Allotropy of Some Heavy Rare-Earth Metals // Transactions of the Metallurgical Society of Aime. 1964. V. 230. P. 568–572.
9. *White J.G., Dismukes J.P.* The Crystal Structure of Scandium Sesquitelluride // Inorg. Chem. 1965. V. 4. P. 1760–1763
10. *Assoud A., Kleinke H.* The sesquitelluride Sc_2Te_3 // Acta Crystallogr., Sect. E: Struct. Rep. Online 2006. V. 62. P. i17–i18.
11. *Chai P., Corbett J.D.* Two new compounds, β-ScTe and Y_3Au_2, and a reassessment of Y2Au. // Acta Crystallogr., Sect. C. V. 67. P. i53–i55.
12. *Maggard P.A., Corbett J.D.* Sc2Te: A novel example of condensed metal polyhedra in a metal-rich but relatively electron-poor compound // Angewandte Chemie (Edition international). 1997. V. 36. P. 1974–1976.
13. *Maggard P.A., Corbett J.D.* The synthesis, structure, and bonding of Sc8Te3 and Y8Te3. Cooperative matrix and bonding effects in the solid state // Inorg. Chem. 1998. V. 37. P. 814–820.
14. *Gupta S., Maggard P.A., Corbett J.D.* A bismuth-stabilized metal-rich telluride Lu9 Bi ~ 1.0 Te ~ 1.0 - Synthesis and characterization // European J. Inorganic Chemistry. 2010. V. 18. P. 2620–2625.
15. *Pardo M.P., Flahaut J.* Les tellurures superieurs des terres rares, de formules L2Te5 et LTe3 // Bulletin de la Societe Chimique de France. 1967. V. 1967. P. 3658–3664.
16. *Brixner L.H.* Structure and electrical properties of some new rare earth arsenides, antimonides and tellurides // J. Inorganic and Nuclear Chemistry. 1960. V. 15. P. 199–201.
17. *Castro-Castro L.M., Chen Ling, Corbett J.D.* Condensed rare-earth metal-rich tellurides. Extension of layered (Sc_6PdTe_2)-type compounds to yttrium and lutetium analogues and to Y_7Te_2, the limiting binary member // J. Solid State Chem. 2007. V. 180. P. 3172–3179.

18. *Weirich T.E., Ramlau R., Simon A., Hovmoeller S., Zou X.-D.* A crystal structure determined to 0.02 Å accuracy by electron crystallography // Nature (London). 1996. V. 382. P. 144–146.
19. *Shevchenko V.Y., Blatov V.A., Ilyushin G.D.* Structural Chemistry of Intermetallic Compounds: Geometric and Topological Analysis; Cluster Precursors *K*4, *K*6, and *K*21; and Self-Assembly of Crystal Structure Cs_2Hg_2-*aP*8, Cs_2Hg_4-*oI*12, and $Cs_{10}Hg_{38}$-*tI*48 // Glass Physics and Chemistry. 2022. V. 48. P. 155–162.
20. *Ilyushin G.D.* Intermetallic compounds Li_kM_n (M = Ag, Au, Pt, Pd, Ir, Rh): Geometrical and topological analysis, tetrahedral cluster precursors, and self-assembly of crystal structures // Crystallography Reports, 2020.V. 65. P. 202–210.
21. *Shevchenko V.Y., Blatov V.A., Ilyushin G.D.* Cluster self-organization of intermetallic systems: New two-layer nanocluster precursors K64 = 0@8(Sn_4Ba_4)@56(Na_4Sn_{52} and K47 = Na@Sn_{16}@Na_{30} in the crystal structure of $Na_{52}Ba_4Sn_{80}$-*cF*540 // Glass Physics and Chemistry. 2020. V. 46. P. 448–454.
22. *Ilyushin G.D.* Intermetallic Compounds Na_kM_n (*M* = K, Cs, Ba, Ag, Pt, Au, Zn, Bi, Sb): Geometrical and Topological Analysis, Cluster Precursors, and Self-Assembly of Crystal Structures // Crystallography Reports. 2020. V. 65. № 4. P. 539–545.
23. *Ilyushin G.D.* Intermetallic Compounds K_nM_m (*M* = Ag, Au, As, Sb, Bi, Ge, Sn, Pb): Geometrical and Topological Analysis, Cluster Precursors, and Self-Assembly of Crystal Structures // Crystallography Reports. 2020. V. 65. № 7. P. 1095–1105.
24. *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.