

УДК 546.77+539.26

ФОСФИНЗАМЕЩЕННЫЕ КУБАНОВЫЕ КЛАСТЕРЫ С ОСТОВОМ $\text{Mo}_3\text{S}_4\text{Ga}$

© 2019 г. П. А. Петров^{1, 2, *}, Т. С. Сухих^{1, 2}

¹Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

*e-mail: panah@niic.nsc.ru

Поступила в редакцию 26.06.2018 г.

После доработки 04.09.2018 г.

Принята к публикации 26.10.2018 г.

При взаимодействии катионных кластеров $[\text{Mo}_3\text{S}_4(\text{Dppet})_3\text{X}_3]\text{X}$ (I; Dppet = *цис*-1,2-*бис*(дифенилфосфино)этилен; X = Cl, Br) с металлическим галлием в тетрагидрофуране (THF) образуются кубаноподобные кластеры $[\text{Mo}_3\text{S}_4(\text{GaX})(\text{Dppet})_3\text{X}_3]$ (IIa, X = Cl; IIb, X = Br). Из маточного раствора в синтезе IIb выделены кристаллы катионного кластера $[\text{Mo}_3\text{S}_4(\text{Dppet})_3\text{Br}_3](\text{GaBr}_4)$ (III). Структуры комплексов IIa · 1.5THF, IIb · 1.5THF, III · 1.625THF и $[\text{Mo}_3\text{S}_4(\text{Dppe})_3\text{Br}_3](\text{GaBr}_4) \cdot 2\text{THF}$ (IV · 2THF; Dppe = 1,2-*бис*(дифенилфосфино)этан) установлены методом PCA (CIF files CCDC № 1851341–1851344).

Ключевые слова: кластеры, молибден, галлий, фосфины, рентгеноструктурный анализ

DOI: 10.1134/S0132344X1904008X

Кластеры доминируют среди комплексных соединений Mo и W в промежуточных степенях окисления, в особенности содержащих халькогенид-ионы [1]. Одним из устойчивых типов кластеров с богатой химией являются комплексы с шестизлектронным кластерным ядром $[\text{M}_3\text{Q}_4]^{4+}$ (M = Mo, W; Q = S, Se) с различными концевыми лигандами, в числе прочих – моно- и дифосфинами. Преимуществом фосфиновых лигандов является возможность их функционализации для привнесения как дополнительных свойств (например, хиральности или редокс-активности), так и дополнительных донорных атомов [2–7]. Сравнительно недавно, однако, выяснилось, что стабилизированное координацией объемных дифосфиновых лигандов шестизлектронное кластерное ядро $[\text{M}_3\text{S}_4]^{4+}$ может быть превращено в семиэлектронное $[\text{M}_3\text{S}_4]^{3+}$ [8–10]. Процесс восстановления может сопровождаться образованием гетерокубановых производных $[\text{M}_3\text{S}_4\text{M}]^{n+}$ или (для молибденовых кластеров) трансформацией кластерного ядра $\{\text{Mo}_3\text{Q}_4\}$ в $\{\text{Mo}_3\text{Q}_5\}$ [11, 12]. Примеры гетерокубановых производных кластеров Mo и W известны для широкого круга гетероэлементов 6–15 групп. Наиболее многочисленны производные с аква-, циклопентадиенил- и фосфинзамещенными кластерными ядрами [13–22]. Тем не менее для фосфинзамещенных кластеров примеры гетерокубанов, содержащих постпер-

ходный элемент, получены нами лишь недавно [23, 24]. Оказалось, что продукты реакции дифосфиновых кластеров $[\text{Mo}_3\text{Q}_4(\text{Diphos})_3\text{X}_3]\text{X}$ (Diphos = дифосфин) с галлием зависят не только от халькогена и галогена, но и от фосфина. В случае 1,2-*бис*(дифенилфосфино)этана (Dppe) удается выделить и продукт восстановления $[\text{Mo}_3\text{Q}_4(\text{Diphos})_3\text{X}_3]\text{X}$, и кубановый кластер $[\text{Mo}_3\text{S}_4(\text{GaBr})(\text{Dppe})_3\text{Br}_3]$, тогда как для алифатического 1,2-*бис*(диметилфосфино)этана (Dmppe) выделен лишь кубан [23]. С другой стороны, реакция с Ga хлоридного кластера $[\text{Mo}_3\text{S}_4(\text{Dppe})_3\text{Cl}_3]\text{Cl}$ приводит к образованию лишь продукта восстановления, $[\text{Mo}_3\text{S}_4(\text{Dppe})_3\text{Cl}_3]$.

Настоящая работа посвящена изучению реакций с Ga катионных кластеров $[\text{Mo}_3\text{S}_4(\text{Dppet})_3\text{X}_3]\text{X}$ (X = Cl, Br), содержащих координированный *цис*-1,2-*бис*(дифенилфосфино)этилен (Dppet).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Все операции по синтезу, очистке и характеристике комплексов проводили в инертной атмосфере с использованием стандартной аппаратуры Шленка. Растворители для синтезов подвергали обезвоживанию и дегазации кипячением и перегонкой в атмосфере инертного газа с использованием соответствующих осушителей [25]. Исходные комплексы $[\text{Mo}_3\text{S}_4(\text{Dppet})_3\text{X}_3]\text{X}$ (X = Cl (Ia), Br (Ib)) синтезировали аналогично Dppe-замещенным

кластерам исходя из $(Et_4N)_2Mo_3S_7Hal_6$ и Dppet [26] и очищали на колонке с SiO_2 (элюент – $CHCl_3$ –метанол (Ia), ацетон–метанол (Ib)). Спектры ЯМР регистрировали на спектрометре Bruker Avance III 500 с рабочей частотой 500.03 МГц для ядер 1H и 202.46 МГц для ядер ^{31}P . ИК-спектры записывали на приборе SCIMITAR FTS 2000 (таблетки с KBr).

Синтез комплекса $[Mo_3S_4(GaCl)(Dppet)_3Cl_3]$ (IIa).

Твердые $Mo_3S_4(Dppet)_3Cl_4$ (63 мг, 0.587 ммоль) и Ga (109 мг, 1.751 ммоль) помещали в сосуд Шленка, охлаждали до $-196^\circ C$, вакуумировали и сконденсировали в него ~15 мл THF. Температуру смеси доводили до комнатной, полученную суспензию кипятили при интенсивном перемешивании в течение 14 сут, затем отстаивали. Коричнево-зеленый раствор осторожно фильтровали через стеклянный фильтр (G4) в H-образный сосуд Шленка, затем в его второе колено помещали ~20 мл Et_2O . После полного смешения растворителей образовались темные кристаллы IIa · 1.5C₄H₈O, пригодные для PCA. Выход 15 мг (22%).

Найдено, %: C 51.85; H 3.70; S 6.85.

Для C₈₂H₇₄OP₆S₄Cl₄GaMo₃

вычислено, %: C 52.14; H 3.95; S 6.79.

ИК-спектр (KBr; ν , см⁻¹): 3049 ср, 3001 ср, 1618 ср, 1585 ср, 1483 ср, 1433 с, 1308 ср, 1189 ср, 1158 ср, 1096 ср, 1026 ср, 998 ср, 912 ср, 839 ср, 738 с, 691 с, 552 с, 516 с, 489 ср, 442 сл, 423 сл.

Синтез комплекса $[Mo_3S_4(GaBr)(Dppet)_3Br_3]$ (IIb) осуществляли аналогично исходя из $Mo_3S_4(Dppet)_3Br_4$ (111 мг, 0.587 ммоль) и Ga (128 мг, 1.751 ммоль). Выход 35 мг (30%).

Найдено, %: C 47.35; H 3.50; S 6.45.

Для C₈₂H₇₄OP₆S₄Br₄GaMo₃

вычислено, %: C 47.65; H 3.61; S 6.21.

ИК-спектр (KBr; ν , см⁻¹): 3051 ср, 1622 сл, 1583 сл, 1572 сл, 1481 ср, 1433 с, 1332 сл, 1309 сл, 1273 сл, 1190 ср, 1159 ср, 1095 с, 1028 ср, 999 ср, 918 сл, 843 сл, 739 с, 692 с, 551 с, 517 с, 490 ср, 443 сл.

Маточный раствор после синтеза IIb перемещали в другой сосуд Шленка через тефлоновый капилляр в токе аргона. Через некоторое время из раствора выросли темные кристаллы $[Mo_3S_4(Dppet)_3Br_3]-(GaBr_4) \cdot 1.625C_4H_8O$ (III · 1.625C₄H₈O), пригодные для PCA. Выход 15 мг (11%).

Найдено, %: C 42.80; H 3.60; S 5.75.

Для C₈₄H₇₈O_{1.5}P₆S₄Br₇GaMo₃

вычислено, %: C 43.07; H 3.35; S 5.48.

ИК-спектр (KBr; ν , см⁻¹): 3049 ср, 3000 ср, 1619 сл, 1584 сл, 1571 сл, 1482 ср, 1433 с, 1332 сл, 1306 сл, 1273 сл, 1190 ср, 1158 ср, 1131 сл, 1095 с, 1027 ср, 998 ср, 916 сл, 838 сл, 792 сл, 737 с, 690 с, 616 сл, 597 сл, 552 с, 516 с, 488 сл, 474 сл, 441 сл, 420 сл. ЯМР 1H (CD_3CN ; δ , м.д.): 6.24 (т., $J = 7$ Гц, 1H, =CH–), 6.52 (т., $J = 7$ Гц, 1H, =CH–), 6.90–8.05 (м., 20H, 4Ph). ЯМР $^{31}P\{^1H\}$ (CD_3CN ; δ , м.д.): 30.2 (д., $J = 7$ Гц), 40.4 (д., $J = 7$ Гц).

РСА. Все измерения проведены по стандартной методике на автоматическом четырехкружном дифрактометре Bruker-Nonius X8 APEX (двухкоординатный CCD детектор, $\lambda = 0.71073 \text{ \AA}$, графитовый монохроматор). Интенсивности отражений измерены методом ϕ -сканирования узких (0.5°) фреймов. Поглощение учтено эмпирически (SADABS) [27]. Структура расшифрована прямым методом и уточнена полноматричным МНК в анизотропном для неводородных атомов приближении при помощи пакета программ SHELXTL [28] и оболочки OLEX2 [29]. Атомы водорода локализованы геометрически и уточнены в приближении жесткого тела. В структурах IIa · 1.5THF, IIb · 1.5THF и III · 1.625THF некоторые сольватные молекулы THF оказались сильно разупорядоченными, и их не удалось адекватно смоделировать. Вклад этих молекул в электронную плотность был удален с помощью процедуры PLATON/SQUEEZE [30]. Потенциальный объем полостей составил ~500 Å^3 для IIa · 1.5THF и IIb · 1.5THF и ~480 Å^3 для III · 1.625THF. Число электронов на элементарную ячейку составило 105, 117 и 40 соответственно. Это соответствует трем молекулам THF на ячейку и 0.5 на формульную единицу для IIa · 1.5THF и IIb · 1.5THF и одной молекуле THF на ячейку, частично занимающей четыре эквивалентные позиции и 0.125 молекулы на формульную единицу для III · 1.625THF. Кристаллографические характеристики комплекса и детали дифракционного эксперимента приведены в табл. 1.

Кристаллографические данные для структур комплексов I–IV депонированы в Кембриджском банке структурных данных (CCDC № 1851341–1851344; <http://www.ccdc.cam.ac.uk/conts/retrieving.html>).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Кластерные комплексы с Dppet, как и их аналоги с Dpre, синтезировали путем обработки фосфином тиогалогенидного комплекса $(Et_4N)_2[Mo_3S_7X_6]$ [25]. Комплекс Ia, кроме того, можно синтезировать путем замены монодентатного фосфина на бидентатный в реакции $[Mo_3S_4Cl_4(PPh_3)_3]$ с 3 экв. Dppet [31]. Ранее мы наблюдали частичную замену бромид-ионов в $[Mo_3S_4(Dpre)_3Br_3]Br$ при растворении в CH_2Cl_2 или содержащих его смесях

Таблица 1. Кристаллографические данные и параметры уточнения структур Па · 1.5ТНФ, Пб · 1.5ТНФ, Пв · 1.625ТНФ и IV · 2ТНФ

Параметр	Значение			
	Па · 1.5ТНФ	Пб · 1.5ТНФ	Пв · 1.625ТНФ	IV · 2ТНФ
Брутто-формула	$C_{84}H_{78}O_{1.5}S_4P_6Cl_4GaMo_3$	$C_{84}H_{78}O_{1.5}S_4P_6Br_4GaMo_3$	$C_{84.5}H_{79}O_{1.625}S_4P_6Br_7GaMo_3$	$C_{86}H_{88}O_2S_4P_6Br_7GaMo_3$
<i>M</i>	1924.98	2102.78	2351.51	2384.53
Сингония, пр. гр.	Тригональная, $R\bar{3}$	Тригональная, $R\bar{3}$	Моноклиная, <i>C2/c</i>	Моноклиная, $P2_1/n$
Температура, К	150	150	150	150
<i>a</i> , Å	15.256(3)	15.2151(7)	29.7194(9)	18.7589(4)
<i>b</i> , Å	15.256(3)	15.2151(7)	26.6232(8)	22.7059(5)
<i>c</i> , Å	59.471(11)	60.056(3)	25.5155(5)	21.4442(5)
β , град	90	90	115.665(1)	103.104(1)
<i>V</i> , Å ³	11987(5)	12040.2(12)	18196.7(9)	8896.0(3)
<i>Z</i>	6	6	8	4
ρ , мм ⁻¹	1.197	3.050	4.01	4.11
Размер кристалла, мм	$0.35 \times 0.28 \times 0.13$	$0.32 \times 0.20 \times 0.18$	$0.25 \times 0.12 \times 0.10$	$0.25 \times 0.15 \times 0.08$
<i>F</i> (000)	5718	6150	9200	4704
Область сбора данных θ , град	1.579–25.655	1.688–26.368	1.168–26.372	1.431–25.026
Диапазон индексов <i>h</i> , <i>k</i> , <i>l</i>	$-12 \leq h \leq 18, -17 \leq k \leq 7, -71 \leq l \leq 71$	$-18 \leq h \leq 13, -19 \leq k \leq 17, -71 \leq l \leq 75$	$-35 \leq h \leq 37, -33 \leq k \leq 33, -31 \leq l \leq 16$	$-18 \leq h \leq 22, -21 \leq k \leq 27, -25 \leq l \leq 25$
Число измеренных, независимых и наблюдаемых ($I > 2\sigma(I)$) отражений	15189, 4919, 3816	20157, 5474, 4699	62702, 18263, 13188	52629, 15708, 11208
<i>R</i> _{int}	0.0495	0.0309	0.0327	0.047
<i>R</i> ₁ , <i>wR</i> ₂ ($I > 2\sigma(I)$)	0.1095, 0.2359	0.0652, 0.1790	0.0538, 0.0958	0.0493, 0.1327
<i>R</i> ₁ , <i>wR</i> ₂ (все отражения)	0.1261, 0.2419	0.0737, 0.1838	0.0895, 0.1058	0.0819, 0.1436
GOOF	1.088	1.083	1.067	1.072
Число уточняемых параметров	309	309	1006	974
Число ограничений	82	10	72	50
$\Delta\rho_{\max}/\rho_{\min}, e \text{ \AA}^{-3}$	3.47/–2.51	1.65/–4.15	1.56/–1.14	1.86/–1.55

[8]. По этой причине для синтеза Ib не использовали хлорсодержащие растворители.

Нагревание суспензии Ia или Ib в THF с металлическим галлием приводит к ее постепенному исчезновению и образованию коричневого раствора, при медленной диффузии эфира в который кристаллизуются кубановые кластеры IIa, IIb (схема 1). Выход хлорзамещенного продукта меньше, чем его бромидного аналога, что может быть связано с меньшей растворимостью исходного кластера Ia в THF и, как след-

ствие, большим временем, необходимым для завершения реакции. Ранее отмечалось, что для восстановленных кластеров $[\text{Mo}_3\text{S}_4(\text{Dppe})_3\text{Hal}_3]$ растворимость хлоридного аналога также меньше, чем бромидного [10]. Отметим также, что при взаимодействии $[\text{Mo}_3\text{S}_4(\text{Dppe})_3\text{Cl}_3]$ с металлическим галлием не приводит к образованию кубанового кластера; он получен при взаимодействии $[\text{Mo}_3\text{S}_4(\text{Dppe})_3\text{Cl}_3]$ с избытком $[\text{GaCr}^*]_6$ [24].

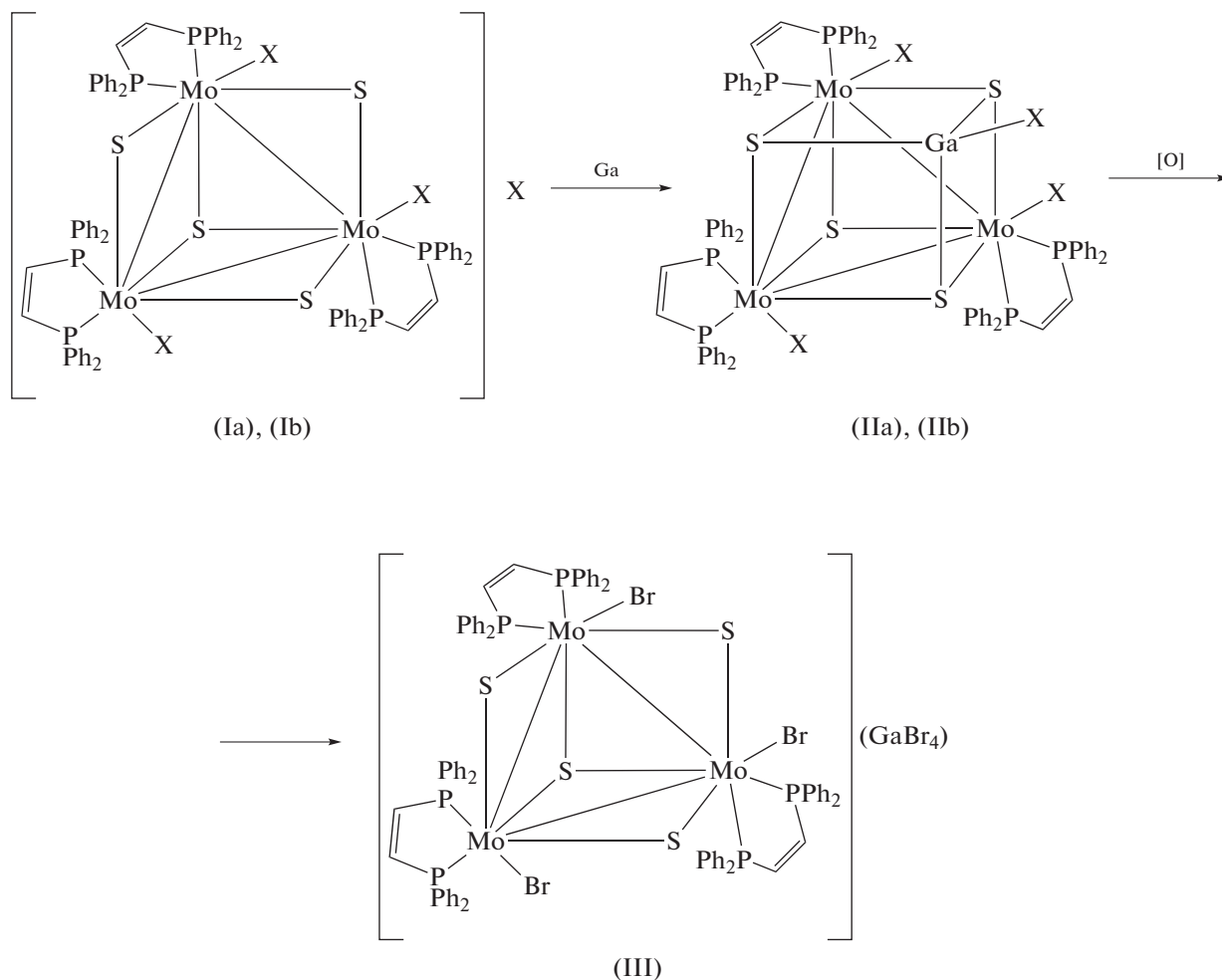


Схема 1.

Изоструктурные фазы IIa · 1.5THF (рис. 1) и IIb · 1.5THF кристаллизуются в тригональной сингонии, инверсионная ось 3 порядка проходит через атомы S(1), Ga(1) и координированный к Ga галогенид. В этой связи треугольник атомов Mo равносторонний. Для галлийсодержащих кубанов, кристаллизующихся в моноклинной сингонии, наблюдалось существенное искажение кластерного ядра, приводящее к укорочению одной из связей Mo—Mo и отклонению угла SGaX от 180°; наибольшее искажение проявляется в

структуре $[\text{Mo}_3\text{S}_4(\text{GaCl})(\text{Dppe})_3\text{Cl}_3]$ (табл. 2). Расстояния Mo—Mo в акваионе $[\text{Mo}_3\text{GaS}_4(\text{H}_2\text{O})_{12}]^{5+}$ [32] существенно меньше таковых для фосфинсодержащих кластеров, тогда как расстояния Mo—Ga, напротив, заметно больше. Это может быть связано как с различающимся числом кластерных электронов в данных кластерах, так и с большим КЧ атома Ga.

Благодаря наличию Ga в низкой формальной степени окисления, фосфинзамещенные кубано-

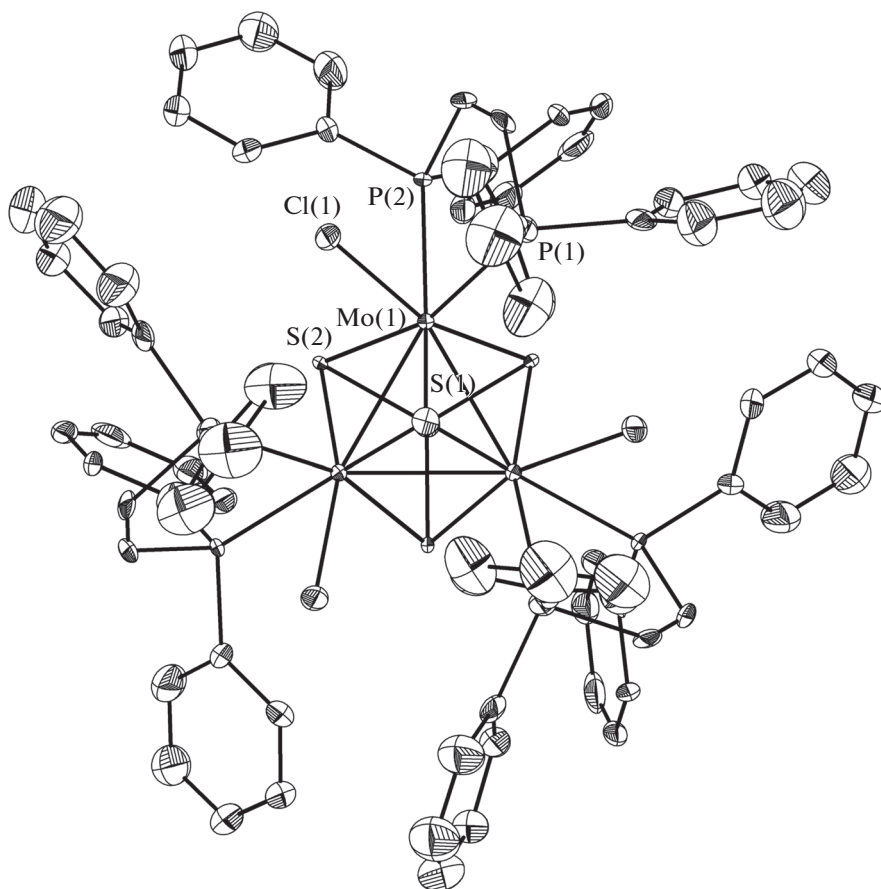


Рис. 1. Строение комплекса Па. Изображены тепловые эллипсоиды с 30%-ной вероятностью. Атомы Н не показаны.

вые кластеры чрезвычайно чувствительны к кислороду и влаге воздуха. Данные статической магнитной восприимчивости поликристаллических образцов Пб дают сильно заниженные по сравнению с ожидаемым для одного неспаренного электрона (1.73 М.Б.) значения $\mu_{\text{эфф}}$. Еще одним примером чрезвычайной чувствительности таких ком-

плексов является образование шестизлектронного катионного кластера $[\text{Mo}_3\text{S}_4(\text{Dppe})_3\text{Br}_3](\text{GaBr}_4)$ (III) при контакте маточного раствора от кристаллизации Пб с примесью O_2 в аргоне.

Кластерный катион в кристаллической структуре $\text{III} \cdot 1.625\text{THF}$ сохраняет геометрические характеристики, свойственные подобным кластерам

Таблица 2. Геометрические характеристики кубановых кластеров Па, Пб и их аналогов

Соединение	Расстояние, Å		Угол SGaX, град
	M–M	M–Ga	
Па*	2.7874(17)	3.299(2)	180
Пб*	2.8023(10)	3.266(2)	180
$[\text{Mo}_3\text{S}_4(\text{GaBr})(\text{Dppe})_3\text{Br}_3]$ [23]	2.795 [18]	3.33 [4]	175.52(5)
$[\text{Mo}_3\text{S}_4(\text{GaBr})(\text{Dmpe})_3\text{Br}_3]$ [23]	2.7784(6)	3.2704(8)	180
$[\text{Mo}_3\text{S}_4(\text{GaCl})(\text{Dppe})_3\text{Cl}_3]$ [24]	2.78 [6]	3.32 [6]	169.23(3)
$[\text{W}_3\text{S}_4(\text{GaBr})_{0.81}(\text{Dppe})_3\text{Br}_3]$ [24]	2.787 [18]	3.41 [4]	175.13(6)
$[\text{Mo}_3\text{GaS}_4(\text{H}_2\text{O})_{12}]^{5+}$ [32]	2.713 [3]	3.52 [2]	

* Настоящая работа

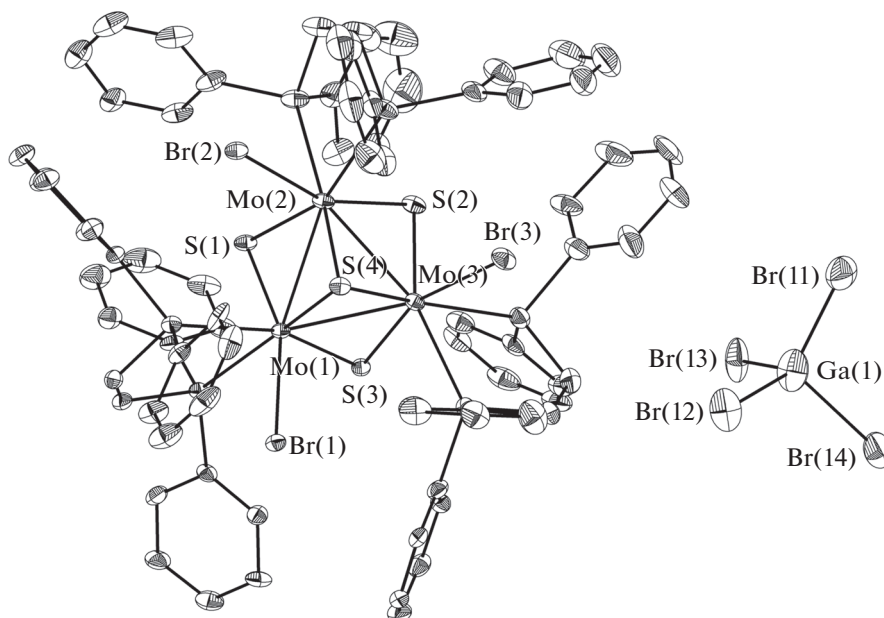


Рис. 2. Строение комплекса III. Изображены тепловые эллипсоиды с 30%-ной вероятностью. Показан один из двух разупорядоченных анионов GaBr_4^- ; атомы H не показаны.

с координированными дифосфиновыми лигандами. Атомы Mo образуют практически равносторонний треугольник с длинами связей Mo–Mo 2.7754(6)–2.7915(6) Å (рис. 2). Данные значения близки к таковым для $[\text{Mo}_3\text{S}_4(\text{Dppet})_3\text{Cl}_3](\text{PF}_6)$ (2.779(1) Å [31]) и $[\text{Mo}_3\text{S}_4(\text{Dppe})_3\text{Br}_{0.75}\text{Cl}_{2.25}](\text{BF}_4)_{0.5}\text{Cl}_{0.5}$ (средн. 2.777 [6] Å) [33], что подтверждает катионное состояние кластера. Противоионы GaBr_4^- разупорядочены по двум близким кристаллографическим позициям с практически равными заселенностями. Кроме того, в структуре присутствуют сольватные молекулы тетрагидрофурана. Катионное состояние кластера также подтверждается спектром ЯМР $^{31}\text{P}\{^1\text{H}\}$, в котором наблюдаются два сигнала при 30.2 и 40.4 м.д., соответствующие атомам P, находящимся по разные стороны плоскости Mo_3 .

Монокристаллы комплекса $[\text{Mo}_3\text{S}_4(\text{Dppe})_3\text{Br}_3](\text{GaBr}_4) \cdot 2\text{THF}$ (IV · 2THF) были выделены с небольшим выходом при попытке кристаллизации кубанового кластера $[\text{Mo}_3\text{S}_4(\text{GaBr})(\text{Dppe})_3\text{Br}_3]$ [23], по-видимому, в результате медленной диффузии воздуха в реакционную смесь. Можно предположить, что образование устойчивой соли кластерного катиона с GaX_4^- является типичным путем окисления кубановых кластеров с ядром $\{\text{M}_3\text{Q}_4\text{Ga}\}$. Расстояния Mo–Mo в комплексе IV · 2THF (2.7811(7)–2.7944(7) Å) и другие геометрические параметры кластерного ядра близки к таковым для III · 1.625THF и других катионных кластеров Mo с координированными дифосфиновыми лигандами.

Таким образом, при взаимодействии кластеров $[\text{Mo}_3\text{S}_4(\text{Dppet})_3\text{X}_3]\text{X}$ (X = Cl, Br) с элементарным Ga были выделены кубаноподобные кластеры $[\text{Mo}_3\text{S}_4(\text{GaX})(\text{Dppet})_3\text{X}_3]$ Ia и Ib, охарактеризованные PCA в виде сольватов Ia · 1.5THF и Ib · 1.5THF. Окисление бромидного кластера следами кислорода приводит к регенерации исходного катионного кластерного ядра и образованию $[\text{Mo}_3\text{S}_4(\text{Dppet})_3\text{Br}_3](\text{GaBr}_4)$.

Работа выполнена при финансовой поддержке РАН (бюджетная программа V.44.4.5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федоров В.Е., Миронов Ю.В., Наумов Н.Г. и др. // Успехи химии. 2007. Т. 76. С. 571 (Fedorov V.E., Mironov Yu.V., Naumov N.G. et al. // Russ. Chem. Rev. 2007. V. 76. P. 529. doi 10.1070/RC2007v076n06ABEH003707).
2. Feliz M., Guillaumon E., Llusar R. et al. // Chem. Eur. J. 2006. V. 12. P. 1486.
3. Guillaumon E., Llusar R., Pérez-Prieto J., Stiriba S.-E. // J. Organomet. Chem. 2008. V. 693. P. 1723.
4. Algarra A.G., Basallote M.G., Fernández-Trujillo M.J. et al. // Inorg. Chem. 2007. V. 46. P. 7668.
5. Avarvari N., Kiracki K., Llusar R. et al. // Inorg. Chem. 2010. V. 49. P. 1894.
6. Basallote M.G., Fernández-Trujillo M.J., Pino-Chamorro J.A. et al. // Inorg. Chem. 2012. V. 51. P. 6794.
7. Beltrán T.F., Llusar R., Sokolov M. et al. // Inorg. Chem. 2013. V. 52. P. 8713.
8. Petrov P.A., Naumov D.Y., Llusar R. et al. // Dalton Trans. 2012. V. 41. P. 14031.

9. Петров П.А., Смоленцев А.И., Конченко С.Н. // Коорд. химия. 2013. Т. 39. № 7. С. 410 (Petrov P.A., Smolentsev A.I., Konchenko S.N. // Russ. J. Coord. Chem. 2013. V. 39. P. 510. doi 10.1134/S1070328413070099).
10. Петров П.А., Соснин Г.А., Наумов Д.Ю., Конченко С.Н. // Журн. структур. химии. 2015. Т. 56. № 4. С. 814 (Petrov P.A., Sosnin G.A., Naumov D.Yu., Konchenko S.N. // J. Struct. Chem. 2015. V. 56. P. 765. doi 10.1134/S002247661504023X).
11. Petrov P.A., Virovets A.V., Alberola A. et al. // Dalton Trans. 2010. V. 39. P. 8875.
12. Petrov P.A., Ryzhikov M.R., Virovets A.V. et al. // Polyhedron. 2014. V. 81. P. 6.
13. Llusar R., Uriel S. // Eur. J. Inorg. Chem. 2003. P. 1271.
14. Seino H., Hidai M. // Chem. Sci. 2011. V. 2. P. 847.
15. Feliz M., Garriga J.M., Llusar R. et al. // Inorg. Chem. 2001. V. 40. P. 6132.
16. Feliz M., Llusar R., Uriel S. et al. // Chem. Eur. J. 2004. V. 10. P. 4308.
17. Feliz M., Llusar R., Uriel S. et al. // Polyhedron. 2005. V. 24. P. 1212.
18. Algarra A.G., Basallote M.G., Feliz M. et al. // Inorg. Chem. 2006. V. 45. P. 5576.
19. Algarra A.G., Basallote M.G., Fernandez-Trujillo M.J. et al. // Dalton Trans. 2010. V. 39. P. 3725.
20. Herbst K., Dahlenburg L., Brorson M. // Inorg. Chem. 2001. V. 40. P. 1989.
21. Herbst K., Monari M., Brorson M. // Inorg. Chem. 2001. V. 40. P. 2979.
22. Herbst K., Brorson M., Carlsson A. // J. Mol. Catal. A. 2010. V. 325. P. 1.
23. Petrov P.A., Naumov D.Yu., Sukhikh T.S. et al. // New J. Chem. 2017. V. 41. P. 7849.
24. Petrov P.A., Nadolinny V.A., Bogomyakov A.S., Sukhikh T.S. // New J. Chem. 2018. V. 42. P. 12349.
25. Гордон А., Форд Р. Спутник химика. М.: Мир, 1976. 544 с. (Gordon A.J., Ford R.A. The Chemist's Companion: a Handbook of Practical Data, Techniques, and References. New York: Wiley Interscience, 1972).
26. Fedin V.P., Sokolov M.N., Mironov Yu.V. et al. // Inorg. Chim. Acta. 1990. V. 167. P. 39.
27. APEX2 (version 1.08), SAINT (version 7.03), SADABS (version 2.11), SHELXTL (version 6.12). Madison (WI, USA): Bruker AXS Inc., 2004.
28. Sheldrick G.M. // Acta Crystallogr. A. 2015. V. 71. P. 3.
29. Dolomanov O.V., Bourhis L.J., Gildea R.J. et al. // J. Appl. Cryst. 2009. V. 42. P. 339.
30. Spek A.L. // Acta Crystallogr. D. 2009. V. 65. P. 148.
31. Адонин С.А., Абрамов П.А., Вировец А.В. и др. // Коорд. химия. 2010. Т. 36. № 9. С. 643 (Adonin S.A., Abramov P.A., Virovets A.V. et al. // Russ. J. Coord. Chem. 2010. V. 36. P. 637. doi 10.1134/S1070328410090010).
32. Shibahara T., Kobayashi S., Tsuji N. et al. // Inorg. Chem. 1997. V. 36. P. 1702.
33. Estevan F., Feliz M., Llusar R. et al. // Polyhedron. 2001. V. 20. P. 527.