

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ
НЕОРГАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 548.3;548.4

ПОЛИЭДРЫ ГОМОГЕННОСТИ И ПЕРВИЧНОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ
ХАЛЬКОПИРИТА В ТЕТРАЭДРЕ Cd–Ge–Mn–As[#]

© 2019 г. Г. Д. Нипан¹, *, А. Н. Аронов¹

¹Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН,
Ленинский пр-т, 31, Москва, 119991 Россия

*E-mail: nipan@igic.ras.ru

Поступила в редакцию 18.03.2019 г.

После доработки 17.04.2019 г.

Принята к публикации 17.06.2019 г.

Методом топологического представления фазовых состояний с использованием фрагментарных экспериментальных данных построены изотермы T - x - y - z -проекции p - T - x - y - z фазовой диаграммы системы Cd–Ge–Mn–As. В отсутствие расплава (ниже 320°C) установлено 18 стабильных равновесий с участием четырех кристаллических фаз. Для ограниченного твердого раствора (Cd,Ge,Mn)As₂ со структурой халькопирита выделено 8 кристаллических фаз, влияющих на его катионный состав: Cd₃As₂, CdAs₂, GeAs, GeAs₂, Ge, MnAs, MnGeAs₂ и As. Показано, что область гомогенности (Cd,Ge,Mn)As₂ представляет собой 14-вершинный девятигранник, и рассмотрена трансформация полиэдра (Cd,Ge,Mn)As₂ при появлении расплава. Представлена модель полиэдра первичной кристаллизации ограниченного твердого раствора (Cd,Ge,Mn)As₂, находящегося в равновесии с насыщенным паром.

Ключевые слова: фазовые равновесия, твердые растворы

DOI: 10.1134/S0044457X19120134

ВВЕДЕНИЕ

Идея аддитивного совмещения полупроводниковых и ферромагнитных свойств в однофазном материале с помощью твердых растворов [1, 2] упирается в неизоморфизм исходных кристаллических структур. Однако в большинстве случаев сохраняется возможность получения ограниченного твердого раствора, для которого растворимость элементов-допантов определяется фазами, находящимися с ним в равновесии.

Физико-химические исследования твердого раствора (Cd,Ge,Mn)As₂ [3] со структурой халькопирита, ограниченные рамками псевдобинарных систем CdGeAs₂–Mn [3], CdGeAs₂–MnAs [4] и CdGeAs₂–MnGeAs₂ [5], не позволяют составить полную картину фазовых равновесий с участием (Cd,Ge,Mn)As₂ и установить границы гомогенности этого твердого раствора в четверной системе Cd–Ge–Mn–As.

Цель настоящей работы – построение ключевых изотерм T - x - y - z -проекции p - T - x - y - z фазовой диаграммы системы Cd–Ge–Mn–As (p – давление, T – температура, x , y , z – независимые координаты состава), изотермического полиэдра

ограниченного твердого раствора со структурой халькопирита (Cd,Ge,Mn)As₂ в отсутствие расплава и полиэдра первичной кристаллизации (Cd,Ge,Mn)As₂, находящегося в равновесии с насыщенным паром.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Полупроводниковая кристаллическая фаза CdGeAs₂ со структурой халькопирита ограничено растворяет Mn, и в этом физико-химическом исследовании базовой является система Cd–Ge–As, для которой первая диаграмма стабильных фазовых равновесий построена полвека назад [6]. За прошедшее время были уточнены температуры и состав расплава для невариантных эвтектических равновесий $SSSLV$ с участием трех кристаллических фаз, расплава и пара [7–12], а также получены метастабильные кристаллические фазы Cd₂GeAs₄ [13], Cd₄Ge₃As₅ [14], Cd₃Ge₂As₄ [15, 16] и очерчена область стеклообразования в треугольнике составов [8, 17, 18].

Фазовые равновесия в системе Cd–Mn–As исследованы фрагментарно. Сообщается, что в частной системе CdAs₂–Cd₃As₂–MnAs кристаллические фазы на основе трехкомпонентных соединений не образуются [19], но в ограниченном

[#] К статье имеются дополнительные материалы, доступные по doi: 10.1134/S0044457X19120134

твердом растворе $(\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x)_3\text{As}_2$ допустимо замещение $\sim 15\%$ Cd на Mn [20]. В граничной бинарной системе Mn–As существует целый ряд интерметаллидов [21], а в системе Cd–Mn они не обнаружены [22].

Получена кристаллическая фаза MnGeAs_2 со структурой халькопирита [23], но система Ge–Mn–As не изучена. Однако наряду с термодинамической оценкой вероятных равновесных состояний между интерметаллидами систем Mn–As и Mn–Ge [24] существуют детальные фазовые диаграммы родственной системы Ge–Fe–As [25].

Отсутствуют какие-либо фазовые диаграммы для системы Cd–Mn–Ge, но представление о ней можно составить, используя изотермическую диаграмму In–Mn–Ge [26], так как легкоплавкий Cd не образует с Mn и Ge интерметаллидов, легкоплавкий In образует единственный интерметаллид Mn_3In , инконгруэнтно плавящийся выше 900°C , а тройные интерметаллиды в этих системах не образуются.

Несмотря на изоморфизм CdGeAs_2 и MnGeAs_2 , непрерывный твердый раствор со структурой халькопирита в системе Cd–Ge–Mn–As не образуется. Вопрос о концентрационной протяженности ограниченных твердых растворов остается открытым. Согласно [27], предельная растворимость Mn в поликристаллических фазах $(\text{CdGe}, \text{Mn})\text{As}_2$ находится на уровне 0.35 мол. %, а для монокристаллов $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{GeAs}_2$ величина x ограничивается значением 0.037 [28–30].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведен изотермический концентрационный тетраэдр системы Cd–Ge–Mn–As, разделенный на 18 треугольных пирамид, представляющих фазовые равновесия $SSSSV$ с участием четырех кристаллических фаз и насыщенного пара. Нестехиометрия и полиморфизм кристаллических фаз, а также составы пара, принадлежащие ребру Cd–As, не рассматриваются. В квазичетверной системе Cd–Ge–MnAs–As тетраангуляция проведена гипотетически при использовании работ [25, 26] и фазовый состав не изменяется до появления расплава на основе Cd ($\sim 320^\circ\text{C}$). В экспериментально исследованной квазичетверной системе Cd_3As_2 –Ge–MnAs–As расплав появляется при 595°C , и с ростом температуры диаграммы становятся все более громоздкими и неудобными для восприятия даже при 3D-визуализации (S1–S6 Supporting Information). Следует отметить, что Cd_3As_2 можно считать компонентом, так как кристаллическая фаза Cd_3As_2 конгруэнтно сублимируется и плавится, а расплав конгруэнтно испаряется [31], но MnAs компонентом не является из-за инконгруэнтных процессов сублимации и испарения.

Особый интерес представляют равновесия с участием ограниченного твердого раствора со структурой халькопирита $(\text{Cd}, \text{Ge}, \text{Mn})\text{As}_2$. Образцы, содержащие сплавы Ge–As, склонны к образованию метастабильных состояний и стеклообразованию, и сведения о фазовых равновесиях в квазитройной системе Ge–CdAs₂–As достаточно противоречивы. При измерении давления насыщенного пара над образцами системы Cd_3As_2 – CdGeAs_2 – CdAs_2 статическим тензиметрическим методом [11], который позволяет следить за установлением равновесий, обнаружена только одна моноварианта $SSSV$ (три кристаллические фазы и пар), поэтому вызывает серьезное сомнение стабильное существование фазы Cd_2GeAs_4 даже в ограниченном интервале температур [9]. Хотя на диаграмме (рис. 1) приведена фигуративная точка GeAs_2 , согласно тензиметрическим исследованиям [12], кристаллическая фаза GeAs_2 метастабильна по отношению к GeAs и нода GeAs_2 – CdAs_2 соответствует варианту метастабильной триангуляции, а стабильной является нода CdGeAs_2 –As.

Ограниченный твердый раствор $(\text{Cd}, \text{Ge}, \text{Mn})\text{As}_2$ до 595°C участвует в восьми равновесиях $SSSSV$ (рис. 1) с кристаллическими фазами Cd_3As_2 , CdAs_2 , GeAs, GeAs_2 , MnAs, Ge, As и MnGeAs_2 . При многократном увеличении концентрационную область $(\text{Cd}, \text{Ge}, \text{Mn})\text{As}_2$ можно представить как 14-вершинный девятигранник (рис. 2), у которого 8 вершин являются составами $(\text{Cd}, \text{Ge}, \text{Mn})\text{As}_2$ в равновесиях $SSSSV$, 15 ребер составов отвечают равновесиям $SSSV$ и 8 граней составов обращены к восьми фазам и соответствуют равновесиям $SSLV$.

Подробно равновесия с участием $(\text{Cd}, \text{Ge}, \text{Mn})\text{As}_2$ рассмотрены в табл. 1. При появлении расплава L вместо $SSSSV$ 8 ($(\text{Cd}, \text{Ge}, \text{Mn})\text{As}_2$ –MnAs– Cd_3As_2 – CdAs_2) возникают три равновесия $SSSLV$ и связанные с ними три $SSLV$ и одно SLV . Соответственно на рис. 2 отсекается вершина 8 (штриховое сечение) и образуется грань 15–16–17. Концентрационный полиэдр $(\text{Cd}, \text{Ge}, \text{Mn})\text{As}_2$ трансформируется в 16-вершинный десятигранник (рис. 2), область которого уменьшается в процессе плавления, соответственно область расплава увеличивается. Однако полное описание области расплава в изотермических тетраэдрах или проекции поверхности ликвидуса в неизотермическом тетраэдре для всей системы Cd–Ge–Mn–As вряд ли целесообразно в рамках настоящей работы.

Фрагментарные экспериментальные исследования позволили построить модель полиэдра первичной кристаллизации $(\text{Cd}, \text{Ge}, \text{Mn})\text{As}_2$ (рис. 3), который является частью поверхности ликвидуса в тетраэдре составов. Опорными точками явились составы расплава в тройных эвтектиках системы Cd–Ge–As [10–12] (E_1 – 41 мол. % Cd, 18 мол. %

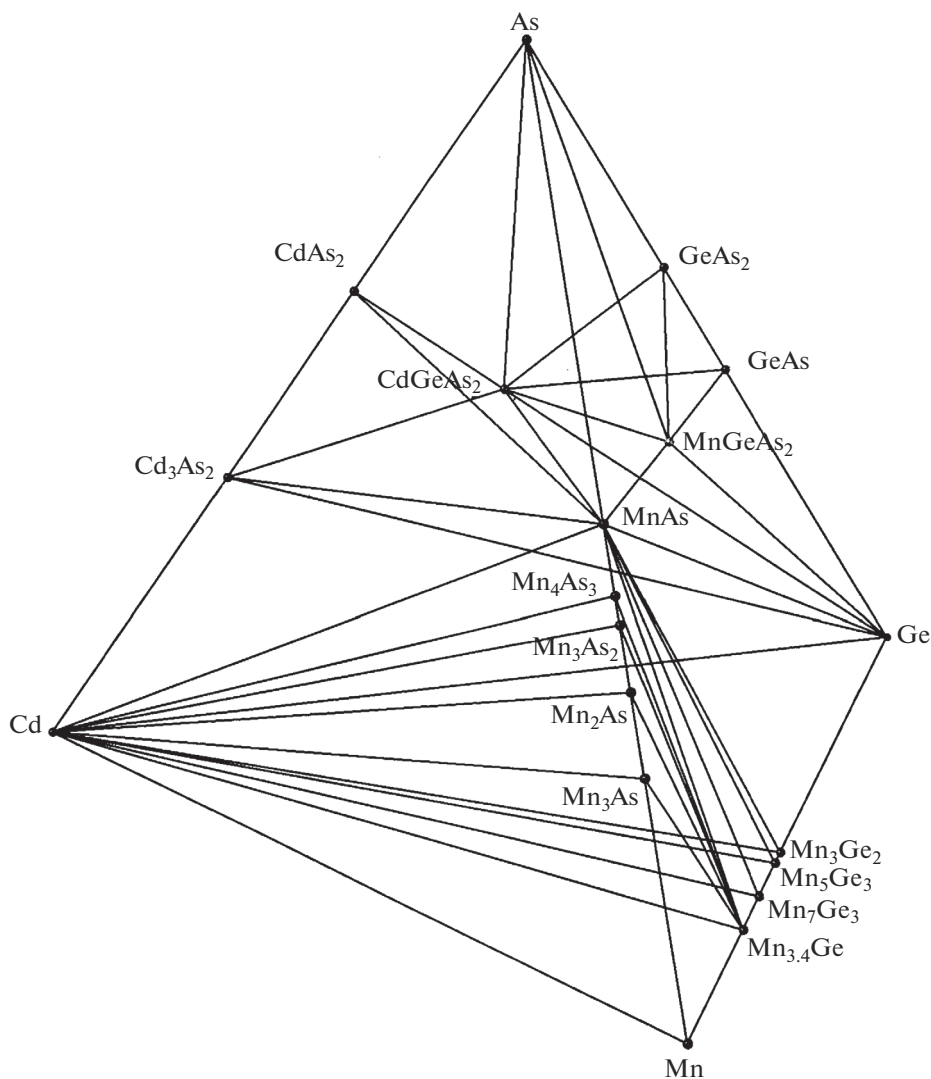


Рис. 1. Изотерма T - x - y - z -проекция p - T - x - y - z фазовой диаграммы системы Cd-Ge-Mn-As при 300°C.

Ge, 41 мол. % As; E_2 – 35 мол. % Cd, 7 мол. % Ge, 58 мол. % As; E_3 – 30 мол. % Cd, 6 мол. % Ge, 64 мол. % As; E_4 – 18 мол. % Cd, 21 мол. % Ge, 61 мол. % As; E_5 – 20 мол. % Cd, 32 мол. % Ge, 48 мол. % As) и в квазибинарной системе эвтектического типа CdGeAs₂-MnAs [4] (E_{11} – 21 мол. % Cd, 21 мол. % Ge, 8 мол. % Mn, 50 мол. % As). Фазовый состав равновесий с участием (Cd,Ge,Mn)As₂ и расплава L представлен в табл. 2. В результате тензиметрического анализа квазитройной системы CdGeAs₂-GeAs-As установлено только одно эвтектическое равновесие E_4 и стабильное существование GeAs₂ совместно с расплавом не подтверждается [12]. Не установлено стабильное существование в многофазных равновесиях MnGeAs₂. При кристаллизации расплавов Zn_{1-x}Mn_xGeAs₂ и ZnMn_xGe_{1-x}As₂ ($x = 0-0.3$) родствен-

ной системы получены смеси GeAs, MnAs, (Zn,Mn)GeAs₂ и Zn₃As₂, ZnAs₂, MnAs, (Zn,Mn)GeAs₂, которые имеют эвтектический характер плавления [32], а при кристаллизации из расплава Cd_{1-x}Mn_xGeAs₂ при $x > 0.05$ наблюдается образование MnAs [29].

В итоге рассматриваются пять четверных эвтектик (E_6-E_{10}) с участием MnAs (табл. 2), для которых содержание Mn в эвтектическом расплаве не превышает 10 мол. %. Криволинейный полиэдр первичной кристаллизации (Cd,Ge,Mn)As₂ представляет собой 10-вершинный семигранник. Плоская грань $E_1-E_2-E_3-E_4-E_5$ отвечает кристаллизации беспримесного CdGeAs₂ в тройной системе. Кривые, связывающие вершины E_1 , E_2 , E_3 , E_4 , E_5 , соответствуют составу расплава при совместной кристаллизации CdGeAs₂ с одной из

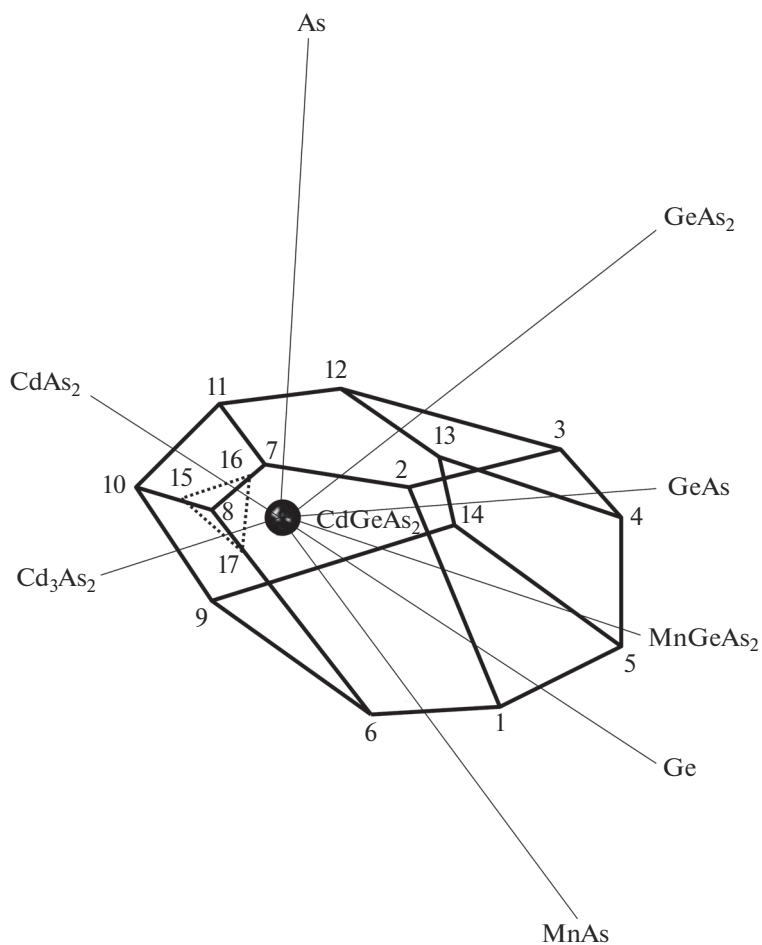


Рис. 2. Изотермический полиэдр ограниченного твердого раствора со структурой халькопирита $(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2$.

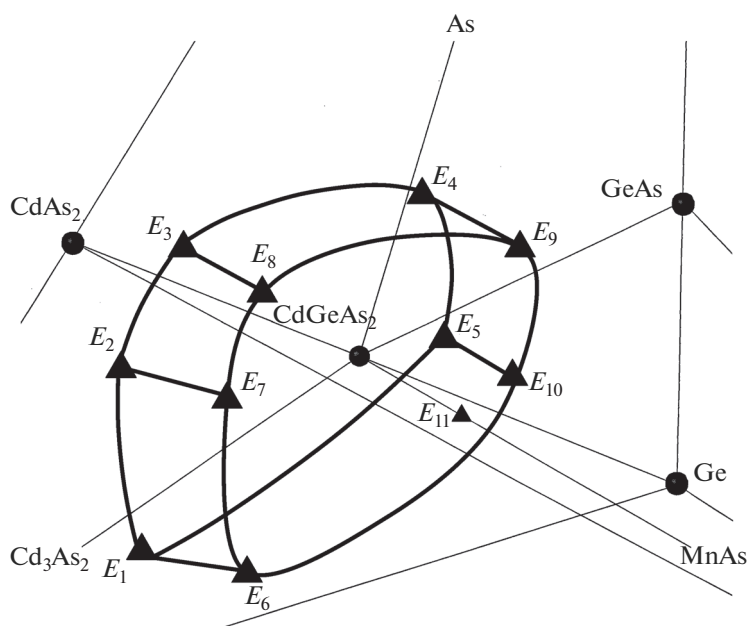


Рис. 3. Полиэдр первичной кристаллизации $(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2$.

Таблица 1. Многофазные равновесия с участием халькопирита $(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2$ (рис. 2)

Вершина	$SSSSV$ ($SSSLV$), конденсированные фазы
1	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--MnGeAs}_2\text{--MnAs--Ge}$
2	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--MnGeAs}_2\text{--MnAs--As}$
3	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--MnGeAs}_2\text{--GeAs}_2\text{--As}$
4	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--MnGeAs}_2\text{--GeAs}_2\text{--GeAs}$
5	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--MnGeAs}_2\text{--GeAs--Ge}$
6	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--MnAs--Cd}_3\text{As}_2\text{--Ge}$
7	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--MnAs--CdAs}_2\text{--As}$
8	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--MnAs--Cd}_3\text{As}_2\text{--CdAs}_2$
15	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--L--Cd}_3\text{As}_2\text{--CdAs}_2$
16	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--L--MnAs--CdAs}_2$
17	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--L--MnAs--Cd}_3\text{As}_2$
Ребро	$SSSV$ ($SSLV$), конденсированные фазы
1–2	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--MnGeAs}_2\text{--MnAs}$
1–5	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--MnGeAs}_2\text{--Ge}$
1–6	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--MnAs--Ge}$
2–3	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--MnGeAs}_2\text{--As}$
2–7	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--MnAs--As}$
3–4	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--MnGeAs}_2\text{--GeAs}_2$
3–12	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--GeAs}_2\text{--As}$
4–5	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--MnGeAs}_2\text{--GeAs}$
4–13	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--GeAs}_2\text{--GeAs}$
5–14	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--GeAs--Ge}$
6–8	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--MnAs--Cd}_3\text{As}_2$
6–9	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--Cd}_3\text{As}_2\text{--Ge}$
7–8	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--MnAs--CdAs}_2$
7–11	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--CdAs}_2\text{--As}$
8–10	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--Cd}_3\text{As}_2\text{--CdAs}_2$
15–16	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--L--CdAs}_2$
15–17	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--L--Cd}_3\text{As}_2$
16–17	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--L--MnAs}$
Грань	SSV (SLV), конденсированные фазы
1–2–3–4–5	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--MnGeAs}_2$
1–2–7–8–6	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--MnAs}$
1–5–14–9–6	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--Ge}$
2–3–12–11–7	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--As}$
3–4–13–12	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--GeAs}_2$
4–5–14–13	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--GeAs}$
6–8–10–9	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--Cd}_3\text{As}_2$
7–8–10–11	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--CdAs}_2$
15–16–17–11	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--L}$

Таблица 2. Многофазные равновесия с участием халькопирита $(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2$ и расплава (рис. 3)

Вершина	$SSSLV$ и $SSSSLV$, конденсированные фазы
E_1	$\text{CdGeAs}_2\text{--L--Cd}_3\text{As}_2\text{--Ge}$
E_2	$\text{CdGeAs}_2\text{--L--Cd}_3\text{As}_2\text{--CdAs}_2$
E_3	$\text{CdGeAs}_2\text{--L--CdAs}_2\text{--As}$
E_4	$\text{CdGeAs}_2\text{--L--GeAs--As}$
E_5	$\text{CdGeAs}_2\text{--L--GeAs--Ge}$
E_6	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--L--Cd}_3\text{As}_2\text{--Ge--MnAs}$
E_7	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--L--Cd}_3\text{As}_2\text{--CdAs}_2\text{--MnAs}$
E_8	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--L--CdAs}_2\text{--As--MnAs}$
E_9	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--L--GeAs--As--MnAs}$
E_{10}	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--L--GeAs--Ge--MnAs}$
E_{11}^* (условная)	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--L--MnAs}$
Ребро	$SSLV$ и $SSSSLV$, конденсированные фазы
$E_1\text{--}E_2$	$\text{CdGeAs}_2\text{--L--Cd}_3\text{As}_2$
$E_1\text{--}E_5$	$\text{CdGeAs}_2\text{--L--Ge}$
$E_2\text{--}E_3$	$\text{CdGeAs}_2\text{--L--CdAs}_2$
$E_3\text{--}E_4$	$\text{CdGeAs}_2\text{--L--As}$
$E_4\text{--}E_5$	$\text{CdGeAs}_2\text{--L--GeAs}$
$E_1\text{--}E_6$	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--L--Cd}_3\text{As}_2\text{--Ge}$
$E_2\text{--}E_7$	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--L--Cd}_3\text{As}_2\text{--CdAs}_2$
$E_3\text{--}E_8$	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--L--CdAs}_2\text{--As}$
$E_4\text{--}E_9$	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--L--GeAs--As}$
$E_5\text{--}E_{10}$	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--L--GeAs--Ge}$
$E_6\text{--}E_7$	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--L--Cd}_3\text{As}_2\text{--MnAs}$
$E_6\text{--}E_{10}$	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--L--Ge--MnAs}$
$E_7\text{--}E_8$	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--L--CdAs}_2\text{--MnAs}$
$E_8\text{--}E_9$	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--L--As--MnAs}$
$E_9\text{--}E_{10}$	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--L--GeAs--MnAs}$
Грань	SLV и $SSLV$, конденсированные фазы
$E_1\text{--}E_2\text{--}E_3\text{--}E_4\text{--}E_5$	$\text{CdGeAs}_2\text{--L}$
$E_1\text{--}E_2\text{--}E_7\text{--}E_6$	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--L--Cd}_3\text{As}_2$
$E_1\text{--}E_5\text{--}E_{10}\text{--}E_6$	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--L--Ge}$
$E_2\text{--}E_3\text{--}E_8\text{--}E_7$	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--CdAs}_2$
$E_3\text{--}E_4\text{--}E_9\text{--}E_8$	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--L--As}$
$E_4\text{--}E_5\text{--}E_{10}\text{--}E_9$	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--L--GeAs}$
$E_6\text{--}E_7\text{--}E_8\text{--}E_9\text{--}E_{10}$	$(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2\text{--L--MnAs}$

пяти равновесных фаз, а сами вершины определяют состав при кристаллизации CdGeAs_2 с двумя фазами. Остальные 6 вершин, 10 ребер и 6 граней принадлежат четверной системе Cd--Ge--Mn--As , в которой из расплава кристаллизуется ограниченный твердый раствор $(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2$ со структурой халькопирита.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При построении изотерм $T\text{--}x\text{--}y\text{--}z$ -проекции $p\text{--}T\text{--}x\text{--}y\text{--}z$ фазовой диаграммы системы Cd--Ge--Mn--As получен концентрационный полиэдр халькопирита $(\text{Cd,Ge,Mn})\text{As}_2$, представляющий собой 14-вершинный девятигранник. Выделено восемь кристаллических фаз, влияющих на со-

став ограниченного твердого раствора (Cd,Ge,Mn)As₂: Cd₃As₂, CdAs₂, GeAs, GeAs₂, Ge, MnAs, MnGeAs₂ и As. Рассмотрена трансформация полиэдра при появлении расплава. Представлена модель полиэдра первичной кристаллизации (Cd,Ge,Mn)As₂ в тетраэдре Cd–Ge–Mn–As.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИОНХ РАН в области фундаментальных научных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dietl T.* // Nature Mater. 2010. V. 9. № 12. P. 965. <https://doi.org/10.1038/nmat2898>
2. *Medvedkin G.A., Hirose K., Ishibashi T. et al.* // J. Cryst. Growth. 2002. V. 236. № 4. P. 609.
3. *Новоторцев В.М., Калинин В.Т., Королева Л.И. и др.* // Журн. неорган. химии. 2005. Т. 50. № 4. С. 552.
4. *Маренкин С.Ф., Изотов А.Д., Федорченко И.В. и др.* // Журн. неорган. химии. 2015. Т. 60. № 3. С. 343. <https://doi.org/10.7868/S0044457X15030149>
5. *Новоторцев В.М., Маренкин С.Ф., Федорченко И.В. и др.* // Журн. неорган. химии. 2010. Т. 55. № 11. С. 1868.
6. *Борщевский А.С., Роевков Н.Д.* // Журн. неорган. химии. 1969. Т. 14. № 8. С. 2253.
7. *Коцюруба Е.С., Борщевский А.С.* // Журн. неорган. химии. 1977. Т. 22. № 11. С. 3174.
8. *Чернов А.П., Фесенко Т.Н., Ольховский В.И. и др.* // Журн. неорган. химии. 1983. Т. 28. № 12. С. 3150.
9. *Чернов А.П., Фесенко Т.Н., Ольховский В.И. и др.* // Журн. неорган. химии. 1984. Т. 29. № 1. С. 210.
10. *Нипан Г.Д., Николаева Л.Н.* // Журн. неорган. химии. 1994. Т. 39. № 6. С. 1001.
11. *Нипан Г.Д., Николаева Л.Н.* // Изв. РАН. Неорган. материалы. 1994. Т. 30. № 8. С. 1017.
12. *Нипан Г.Д.* Дис. ... д-ра хим. наук. М.: ИОНХ РАН, 2003. 248 с.
13. *Mikkelsen J.C., Hong H.Y.-P.* // Mater. Res. Bull. 1974. V. 9. № 9. P. 1209.
14. *Pamplin B.R., Feigelson R.S.* // Mater. Res. Bull. 1979. V. 14. № 2. P. 263.
15. *Riley B.J., Johnson B.R., Crum J.V. et al.* // J. Am. Ceram. Soc. 2012. V. 95. № 7. P. 2161. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2012.05171.x>
16. *Аронов А.Н., Маренкин С.Ф., Федорченко И.В.* // Журн. неорган. химии. 2017. Т. 62. № 12. С. 1642. <https://doi.org/10.7868/S0044457X17120133>
17. *Hong K.S., Berta Y., Speyer R.* // J. Am. Ceram. Soc. 1990. V. 73. № 5. P. 1351.
18. *Johnson B.R., Riley B.J., Sundaram S.K. et al.* // J. Am. Ceram. Soc. 2009. V. 92. № 6. P. 1236. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2009.03001.x>
19. *Риль А.И., Федорченко И.В., Маренкин С.Ф. и др.* // Журн. неорган. химии. 2017. Т. 62. № 7. С. 977. <https://doi.org/10.7868/S0044457X17070200>
20. *Celinski Z., Burian A., Rzepa A. et al.* // Mater. Res. Bull. 1987. V. 22. P. 419.
21. *Okamoto H.* // Bull. Alloy Phase Diag. 1989. V. 10. № 5. P. 549.
22. *Okamoto H.* // J. Phase Equilibria Diff. 2015. V. 36. № 3. P. 292. <https://doi.org/10.1007/s11669-015-0370-x>
23. *Cho S., Choi S., Cha G.-B. et al.* // Solid State Commun. 2004. V. 129. № 9. P. 609. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2003.11.040>
24. *Gokhale A.B., Abbashian R.* // Bull. Alloy Phase Diag. 1990. V. 11. № 5. P. 460.
25. *Чернов А.П., Калинин В.Т.* // Журн. неорган. химии. 1982. Т. 27. № 2. С. 496.
26. *Oliynyk A.O., Djama-Kayad K., Mar A.* // J. Alloys. Compd. 2015. V. 622. P. 837. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.10.170>
27. *Демин Р.В., Королева Л.И., Маренкин С.Ф. и др.* // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. № 21. С. 81.
28. *Новоторцев В.М., Палкина Л.Л., Михайлов С.Г. и др.* // Неорган. материалы. 2005. Т. 41. № 5. С. 519.
29. *Kilanski L., Górská M., Dynowska E. et al.* // J. Appl. Phys. 2014. V. 115. № 13. P. 133917-1. <https://doi.org/10.1063/1.4870474>
30. *Romcevic M., Romcevic N., Trajic J. et al.* // J. Alloys. Compd. 2016. V. 688B. P. 56. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.07.166>
31. *Нипан Г.Д., Гринберг Я.Х., Лазарев В.Б.* // Изв. АН СССР. Неорган. материалы. 1987. Т. 23. № 9. С. 1423.
32. *Matsushita H., Watanabe M., Katsui A.* // J. Phys. Chem. Solids. 2008. V. 69. P. 408. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2007.07.004>