

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ
НЕОРГАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

УДК 544.344.01;546.273;661.635

ФАЗООБРАЗОВАНИЕ В СИСТЕМЕ MgO–V₂O₃–P₂O₅

© 2022 г. М. Н. Смирнова^а, *, М. А. Копьева^а, Г. Д. Нипан^а, Г. Е. Никифорова^а^аИнститут общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН,
Ленинский пр-т, 31, Москва, 119991 Россия

*e-mail: smirnova_macha1989@mail.ru

Поступила в редакцию 20.04.2022 г.

После доработки 11.05.2022 г.

Принята к публикации 11.05.2022 г.

Образцы Mg_{1-x}(BP)_{x/2}O_{1+x}, Mg₃V_{2-2x}P_{2x}O_{6+2x}, Mg₂V_{2-2x}P_{2x}O_{5+2x} и MgV_{2-2x}P_{2x}O_{4+x} (0 ≤ x ≤ 1, шаг x = 0.1), полученные методами сжигания геля или твердофазного спекания и отожженные при 1000°C, исследованы методом рентгенофазового анализа. Получена и исследована методом инфракрасной спектроскопии кристаллическая фаза Mg₃VO₇. Построены диаграммы стабильных и метастабильных равновесий для квазитройной системы 2MgO–V₂O₃–P₂O₅.

Ключевые слова: многокомпонентные оксидные системы, фазовые равновесия, борофосфаты

DOI: 10.31857/S0044457X22600591

ВВЕДЕНИЕ

Борофосфаты щелочноземельных металлов в качестве основных структурных единиц содержат одновременно тетраэдры PO₄ и тригональные (либо тетраэдрические) боратные группы BO₃, связанные между собой вершинами и образующие бесконечные цепочки. Такое разнообразие кристаллической структуры создает перспективы для направленного поиска новых функциональных материалов на основе борофосфатных соединений.

В качестве матриц для создания люминесцентных материалов активно изучаются борофосфаты, образующиеся в квазитройных системах MO–V₂O₃–P₂O₅ (M = Mg, Ca, Sr, Ba) [1–8]; M₃VO₇ (M = Mg, Ba) [9–11], MBVO₅ (M = Ca, Sr, Ba) [12–15], Ba₃VP₃O₁₂ [15–17] и Sr₆VP₅O₂₀ [18, 19], который, вероятно, является одним из составов твердого раствора (SrO)₂(V₂O₃)_n(P₂O₅)_{1-n} (n = 0.1–0.5) с гексагональной структурой [20].

В квазитройной системе MgO–V₂O₃–P₂O₅ обнаружен тройной оксид Mg₃VO₇, низкотемпературная α-форма которого имеет орторомбическую структуру, а при температуре ~1200°C происходит обратимый фазовый переход в гексагональную β-модификацию [10]. В работе [21] сообщалось о получении борофосфата магния состава Mg₆VP₅O₂₀, однако его кристаллическая структура не была определена.

В настоящей работе экспериментально исследованы разрезы MgO–VO₄, Mg₃V₂O₆–Mg₃P₂O₈, Mg₂V₂O₅–Mg₂P₂O₇ и MgV₂O₄ (Mg₂V₄O₈)–MgP₂O₆ (Mg₂P₄O₁₂) квазитройной системы MgO–V₂O₃–P₂O₅ с целью оценки возможности получения тройных оксидов Mg₃VO₇, Mg₆VP₅O₂₀ и установления фазовых состояний с их участием.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Синтез VO₄ осуществляли путем смешивания эквимольных количеств борной кислоты H₃BO₃ (х. ч.) и дигидрофосфата аммония NH₄H₂PO₄ (х. ч.) с водой. В результате реакции (1) образовывалась пена, которую затем нагревали на водяной бане в течение 1 ч. Полученную смесь переносили в керамический тигель и прокаливали при 600°C в течение 10 ч.



Твердые растворы состава Mg_{1-x}(BP)_{x/2}O_{1+x} (шаг x = 0.1) получали твердофазным методом. В качестве исходных соединений использовали MgO и синтезированный VO₄. Рассчитанные количества реагентов перетирали и прокаливали при 1000 и 1100°C.

Образцы для разрезов Mg₃V₂O₆–Mg₃P₂O₈, Mg₂V₂O₅–Mg₂P₂O₇ и MgV₂O₄–MgP₂O₆ синтезировали твердофазным методом, исходными реагентами служили MgO (х. ч.), H₃BO₃ (х. ч.) и/или

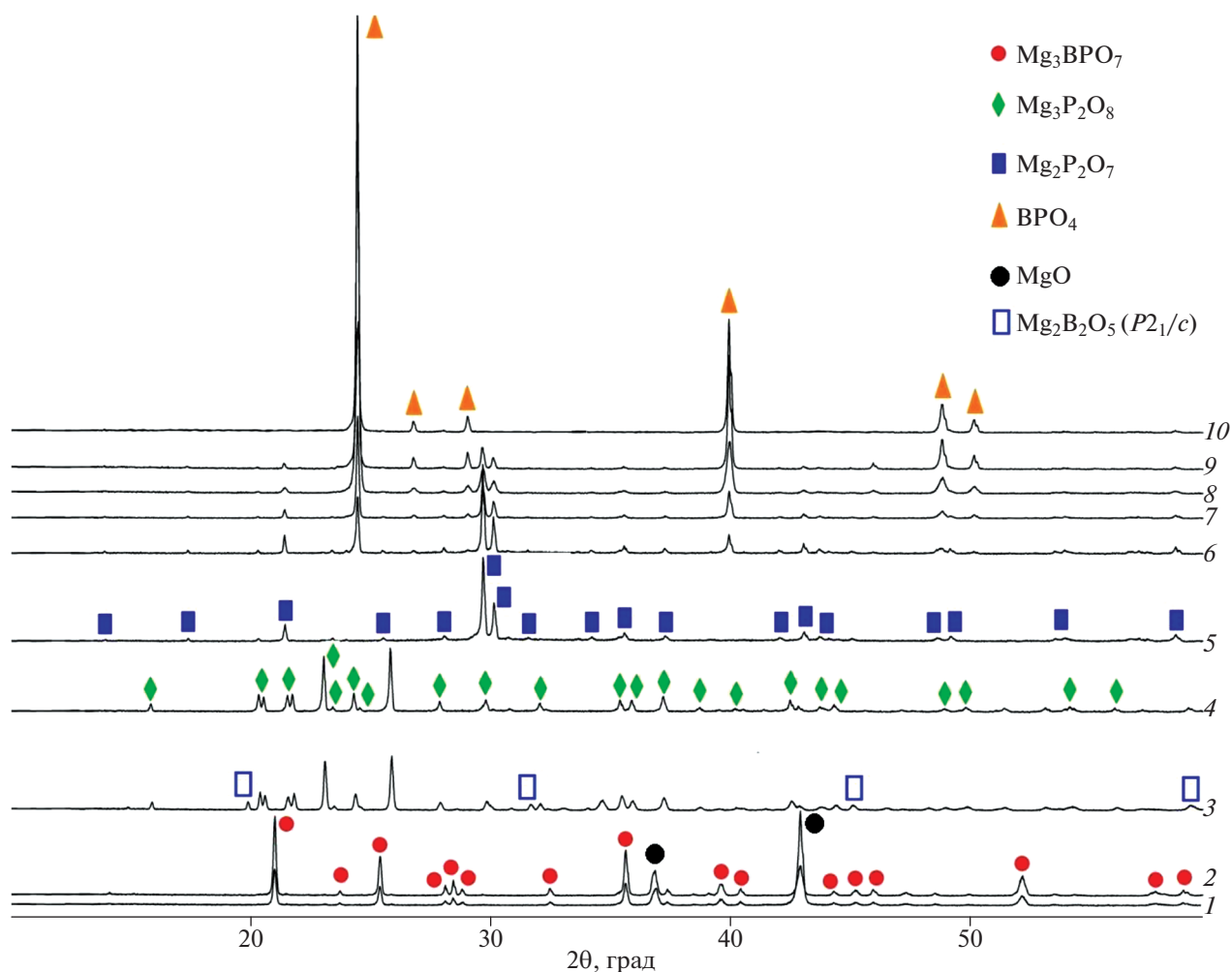


Рис. 1. Рентгенограммы образцов, принадлежащих разрезу MgO–BPO₄. Mg_{1-x}(BP)_{x/2}O_{1+x}; x = 0.1 (1), 0.2 (2), 0.3 (3), 0.4 (4), 0.5 (5), 0.6 (6), 0.7 (7), 0.8 (8), 0.9 (9) и 1 (10).

NH₄H₂PO₄ (х. ч.). Температурную обработку образцов проводили при 1000 и 1100°С.

Рентгенофазовый анализ выполняли на дифрактометре Bruker Advance D8 (CuK_α-излучение) в интервале углов 2θ = 10°–70° с шагом сканирования 0.0133° и выдержкой 0.3 с/шаг. Обработку результатов проводили с помощью программного пакета DIFFRAC. EVA.

ИК-спектры регистрировали на спектрометре Perkin Elmer Spectrum 65 FT-IR в области 4000–400 см⁻¹ с разрешением 2 см⁻¹.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Разрез MgO–BPO₄. Термическая обработка образцов с высоким содержанием бора и фосфора при 1100°С приводила к стеклованию, поэтому для определения фазовых равновесий температу-

ра отжига образцов была снижена до 1000°С. На рис. 1 приведены дифрактограммы образцов Mg_{1-x}(BP)_{x/2}O_{1+x} (шаг x = 0.1). Для составов Mg_{0.9}B_{0.05}P_{0.05}O_{1.1} и Mg_{0.8}B_{0.1}P_{0.1}O_{1.2} (рис. 1, кривые 1 и 2) реализуется стабильное равновесие MgO + α-Mg₃BPO₇. Однако при увеличении в составе бора и фосфора тройной оксид Mg₃BPO₇ не образуется, а возникает метастабильное состояние Mg₂B₂O₅ + Mg₃P₂O₈ (рис. 1, кривая 3). Дальнейшее снижение содержания магния способствует образованию магний-боратного стекла в сочетании с кристаллическими магний-фосфатами. Для состава Mg_{0.6}B_{0.2}P_{0.2}O_{1.4} это ортофосфат магния Mg₃P₂O₈ (рис. 1, кривая 4), а для Mg_{0.5}B_{0.25}P_{0.25}O_{1.5} – пиррофосфат Mg₂P₂O₇ (рис. 1, кривая 5). Начиная с состава Mg_{0.4}B_{0.3}P_{0.3}O_{1.6} до Mg_{0.1}B_{0.45}P_{0.45}O_{1.9} на дифрактограммах наряду с

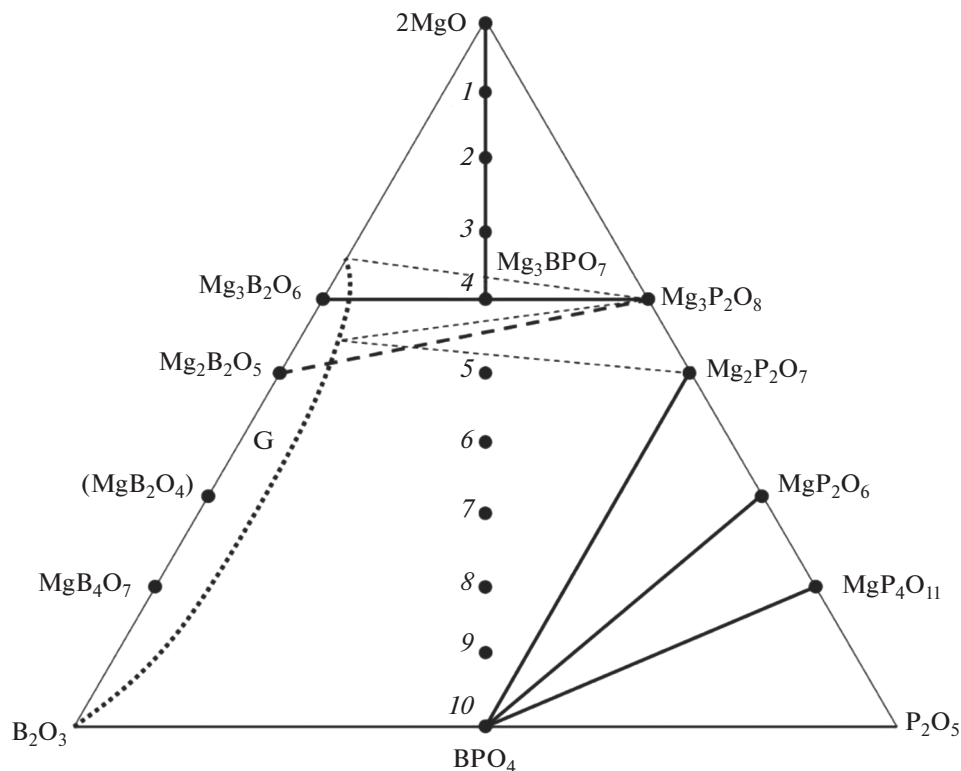


Рис. 2. Диаграмма метастабильных состояний системы $\text{MgO}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{P}_2\text{O}_5$.

$\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$ наблюдаются рефлексы фосфата бора BPO_4 (рис. 1, кривые 6–9).

Следует отметить, что на дифрактограммах отсутствуют рефлексы, относящиеся к магний-боратным фазам, за исключением слабых пиков $\text{Mg}_2\text{B}_2\text{O}_5$ (рис. 1, кривая 3). Анализ литературы показал, что в бинарной системе $\text{MgO}-\text{B}_2\text{O}_3$ существуют три кристаллические фазы: 1) ортоборат магния $\text{Mg}_3\text{B}_2\text{O}_6$ со структурой котоита (пр. гр. $Pn\bar{m}n$, $t_{\text{пл}} = 1410^\circ\text{C}$), 2) фаза $\text{Mg}_2\text{B}_2\text{O}_5$, имеющая метастабильную триклинную модификацию ($P\bar{1}$) и стабильную моноклинную ($P2_1/c$) структуру суанита, устойчивую до $\sim 1330^\circ\text{C}$, 3) орторомбическая фаза MgB_4O_7 ($Pbca$), инконгруэнтно плавящаяся при 995°C [22–24]. Существование метабората магния MgB_2O_4 экспериментально не подтверждено [22]. С учетом вышеизложенного, по данным рентгенофазового анализа была построена диаграмма метастабильных состояний системы $\text{MgO}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{P}_2\text{O}_5$, представленная на рис. 2.

Разрез $\text{Mg}_3\text{B}_2\text{O}_6-\text{Mg}_3\text{P}_2\text{O}_8$. На рис. 3а приведены дифрактограммы образцов $\text{Mg}_3\text{B}_{2-2x}\text{P}_{2x}\text{O}_6+2x$ (шаг $x = 0.1$), отожженных при 1000°C . За исключением крайних составов $\text{Mg}_3\text{B}_2\text{O}_6$ ($x = 0$) и $\text{Mg}_3\text{P}_2\text{O}_8$ ($x = 1$) (рис. 3а, кривые I и II), для промежуточных составов идентифицируется двух-

фазная смесь $\text{Mg}_3\text{B}_2\text{O}_6-\text{Mg}_3\text{P}_2\text{O}_8$ (рис. 3а, кривые 2–10).

На рис. 3б приведены дифрактограммы образцов $\text{Mg}_3\text{B}_{2-2x}\text{P}_{2x}\text{O}_6+2x$ (шаг $x = 0.1$), отожженных при 1100°C . В результате увеличения температуры отжига появляется фаза Mg_3BPO_7 [10], существующая в интервале $0.1 \leq x \leq 0.4$ совместно с $\text{Mg}_3\text{B}_2\text{O}_6$ (рис. 3б, кривые 7–10), а в интервале $0.6 \leq x \leq 0.9$ совместно с $\text{Mg}_3\text{P}_2\text{O}_8$ ($x = 1$) (рис. 3б, кривые 2–5). При длительной временной выдержке Mg_3BPO_7 содержание примесей снижается (рис. 3б, спектр б).

Разрез $\text{Mg}_2\text{B}_2\text{O}_5-\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$. На рис. 4 приведены дифрактограммы образцов $\text{Mg}_2\text{B}_{2-2x}\text{P}_{2x}\text{O}_5+2x$ (шаг $x = 0.1$). При $x = 0$ (рис. 4, кривая I) наблюдается образование бората магния $\text{Mg}_2\text{B}_2\text{O}_5$ с триклинной структурой ($P\bar{1}$), а при $x = 1$ образуется однофазный пирофосфат магния $\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$ (рис. 4, кривая I). При увеличении x от 0.1 до 0.9 постоянно сосуществуют $\text{Mg}_2\text{B}_2\text{O}_5$ с фаррингтонитом $\text{Mg}_3\text{P}_2\text{O}_8$, (рис. 4, кривые 2–10). Кристаллическая фаза $\text{Mg}_6\text{BP}_5\text{O}_{20}$ на разрезе $\text{Mg}_2\text{B}_2\text{O}_5-\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$ не обнаружена. При этом дифрактограмма, приведенная в работе [21], по общему виду и положению основных рефлексов совпадает с дифрактограммой $\text{Mg}_2\text{B}_{0.2}\text{P}_{1.8}\text{O}_{6.8}$ (рис. 4, кривая 2). Воз-

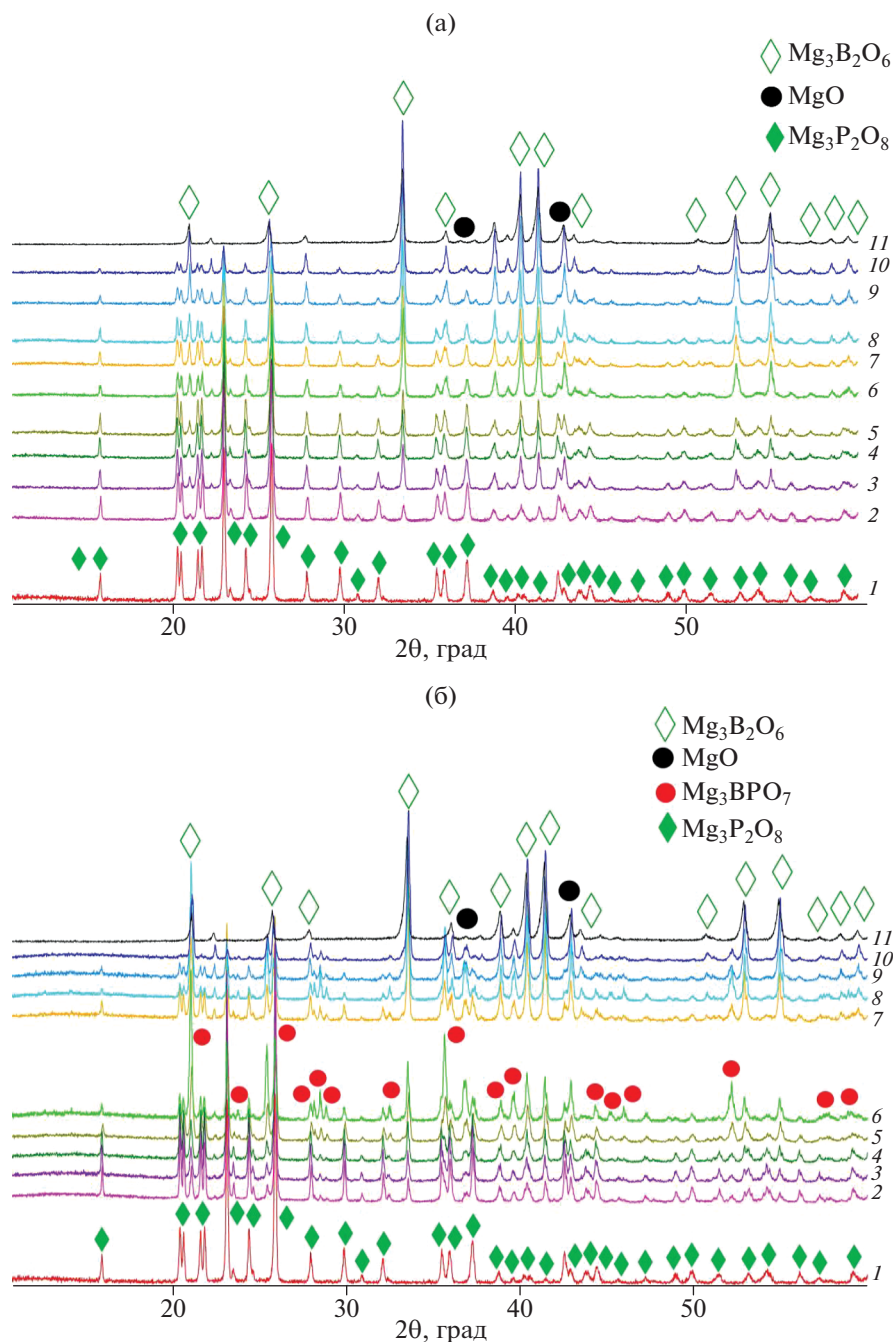


Рис. 3. Рентгенограммы образцов, принадлежащих разрезу Mg₃B₂O₆–Mg₃P₂O₈, после отжига при 1000 (а) и 1100°C (б). Mg₃B₂–_{2x}P_{2x}O₆+_{2x}: x = 0 (11), 0.1 (10), 0.2 (9), 0.3 (8), 0.4 (7), 0.5 (6), 0.6 (5), 0.7 (4), 0.8 (3), 0.9 (2) и 1 (1).

можно, это связано с тем, что авторы [21] получили композитный материал или синтез методом горения раствора способствует встраиванию бора в позиции фосфора в структуре пирофосфата магния.

Разрез MgB₂O₄–MgP₂O₆. На рис. 5 приведены дифрактограммы образцов и MgB₂–_{2x}P_{2x}O₄+ x

(шаг x = 0.1). Образец состава MgB₂O₄ (x = 0) представляет собой смесь MgB₄O₇ и Mg₂B₂O₅ (триклинная и моноклинная сингонии), а фосфат магния MgP₂O₆ (x = 1) представляет собой однофазный поликристаллический материал (рис. 5, кривые 11 и 1). При высоком содержании бора в образцах интерпретация усложняется образованием

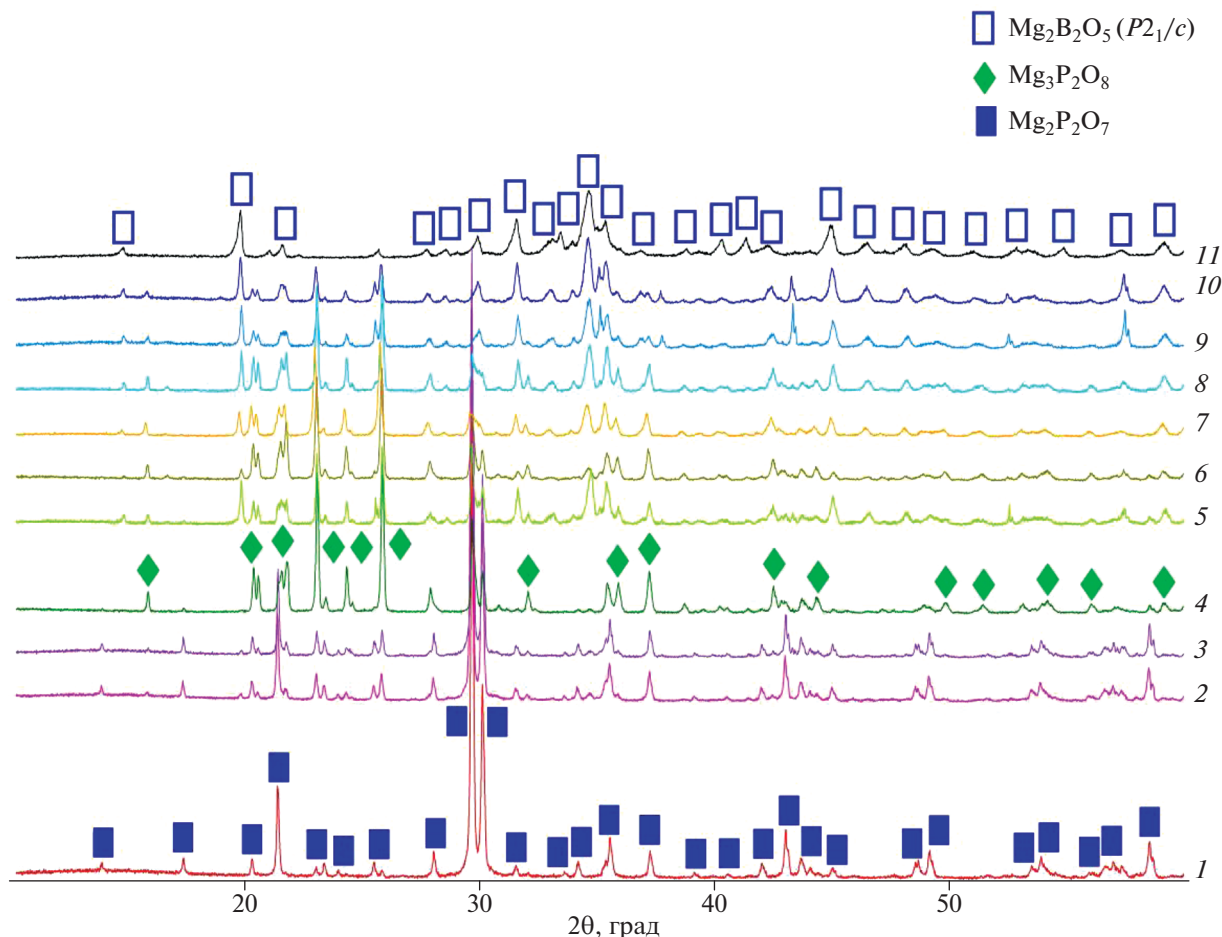


Рис. 4. Рентгенограммы образцов, принадлежащих разрезу $\text{Mg}_2\text{B}_2\text{O}_5\text{--Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$. $\text{Mg}_2\text{B}_{2-2x}\text{P}_{2x}\text{O}_5 + 2x$; $x = 0$ (11), 0.1 (10), 0.2 (9), 0.3 (8), 0.4 (7), 0.5 (6), 0.6 (5), 0.7 (4), 0.8 (3), 0.9 (2) и 1 (1).

метастабильного $\text{Mg}_3\text{P}_2\text{O}_8$, однако можно выделить характерное равновесие $\text{MgB}_4\text{O}_7\text{--Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$ при $x = 0.7$ (рис. 5, кривые 2–10).

На рис. 6 приведена диаграмма стабильных субсолидусных фазовых равновесий системы $\text{MgO--B}_2\text{O}_3\text{--P}_2\text{O}_5$, построенная на основе экспериментальных данных и диаграмм граничных бинарных систем $\text{MgO--B}_2\text{O}_3$ [22], $\text{MgO--P}_2\text{O}_5$ [25] и $\text{B}_2\text{O}_3\text{--P}_2\text{O}_5$ [26, 27]. Цифрами выделены XI областей трехфазных равновесий: I – $\text{MgO--Mg}_3\text{B}_2\text{O}_6\text{--Mg}_3\text{BPO}_7$, II – $\text{MgO--Mg}_3\text{BPO}_7\text{--Mg}_3\text{P}_2\text{O}_8$, III – $\text{Mg}_3\text{B}_2\text{O}_6\text{--Mg}_2\text{B}_2\text{O}_5\text{--Mg}_3\text{BPO}_7$, IV – $\text{Mg}_2\text{B}_2\text{O}_5\text{--Mg}_3\text{BPO}_7\text{--Mg}_3\text{P}_2\text{O}_8$, V – $\text{Mg}_2\text{B}_2\text{O}_5\text{--Mg}_3\text{P}_2\text{O}_8\text{--Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$, VI – $\text{Mg}_2\text{B}_2\text{O}_5\text{--MgB}_4\text{O}_7\text{--Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$, VII – $\text{MgB}_4\text{O}_7\text{--Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7\text{--BPO}_4$, VIII – $\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7\text{--MgP}_2\text{O}_6\text{--BPO}_4$, IX – $\text{MgB}_4\text{O}_7\text{--B}_2\text{O}_3\text{--BPO}_4$, X – $\text{MgP}_2\text{O}_6\text{--MgP}_4\text{O}_{11}\text{--BPO}_4$ и XI – $\text{MgP}_4\text{O}_{11}\text{--P}_2\text{O}_5\text{--BPO}_4$.

Инфракрасная спектроскопия Mg_3BPO_7 . На рис. 7 представлены ИК-спектры $\text{Mg}_3\text{B}_2\text{O}_6$,

$\text{Mg}_3\text{P}_2\text{O}_8$, а также образца, в котором доминирует фаза Mg_3BPO_7 (рис. 7, спектры $\text{Mg}_3\text{B}_2\text{O}_6$, $\text{Mg}_3\text{P}_2\text{O}_8$ и $[\text{Mg}_3\text{BPO}_7]$ соответственно).

Для котоита $\text{Mg}_3\text{B}_2\text{O}_6$ полосы поглощения при 1280 и 1190 cm^{-1} соответствуют асимметричным, а при 910 cm^{-1} – симметричным валентным колебаниям В–О в пирамидах BO_3 [28]. Деформационным колебаниям BO_3 отвечают пики при 730, 650, 610, 500, 450 и 420 cm^{-1} [28]. В случае ортофосфата $\text{Mg}_3\text{P}_2\text{O}_8$ асимметричные и симметричные валентные колебания Р–О наблюдаются при 1070/1040 и 980 cm^{-1} , а деформационные колебания в тетраэдре PO_4 – при 630, 590 и 500 cm^{-1} [29, 30].

ИК-спектр Mg_3BPO_7 соответствует спектру, полученному в работе [10]. Наблюдаются валентные асимметричные/симметричные колебания В–О при 1230/1050 cm^{-1} и Р–О при 1050/990 cm^{-1} , а также деформационные колебания треугольни-

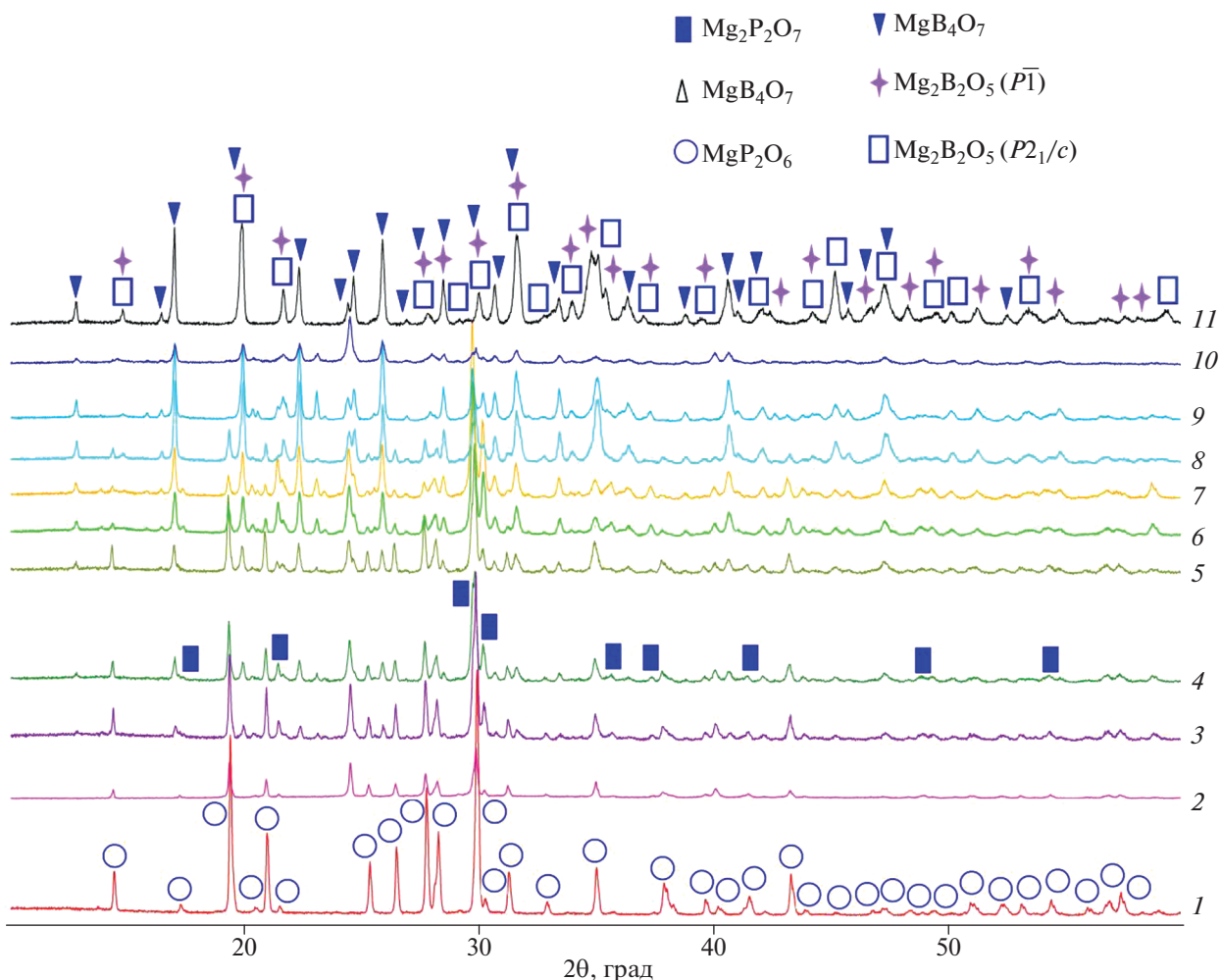


Рис. 5. Рентгенограммы образцов, принадлежащих разрезу MgB₂O₄–MgP₂O₆. MgB_{2–2x}P_{2x}O_{4+x}; x = 0 (11), 0.1 (10), 0.2 (9), 0.3 (8), 0.4 (7), 0.5 (6), 0.6 (5), 0.7 (4), 0.8 (3), 0.9 (2) и 1 (1).

ков VO₃ при 790, 750 и 660 см⁻¹ совместно с тетраэдрами PO₄ при 560 и 420 см⁻¹.

В завершение отметим, что получение стабильных кристаллических фаз в системах, содержащих одновременно B₂O₃ и P₂O₅ [30], представляет самостоятельную материаловедческую задачу, решение которой предусматривает, наряду с баротермическими условиями синтеза, обоснованный выбор прекурсоров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Образцы Mg_{1-x}(BP)_{x/2}O_{1+x}, Mg₃B_{2-2x}P_{2x}O_{6+2x}, Mg₂B_{2-2x}P_{2x}O_{5+2x} и MgB_{2-2x}P_{2x}O_{4+x} (0 ≤ x ≤ 1, шаг x = 0.1), полученные методами сжигания геля или

твердофазного спекания и отожженные при 1000°C, исследованы методами рентгенофазового анализа и ИК-спектроскопии. Показано влияние прекурсоров и способа синтеза на фазообразование в системе MgO–B₂O₃–P₂O₅. Построены диаграммы стабильных и метастабильных равновесий для квазитройной системы 2MgO–B₂O₃–P₂O₅. Полученные сведения расширяют представления о фазообразовании в системе MgO–B₂O₃–P₂O₅ и имеют важное практическое значение для создания новых люминесцентных материалов.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследования проводились с использованием оборудования ЦКП ФМИ ИОНХ РАН.

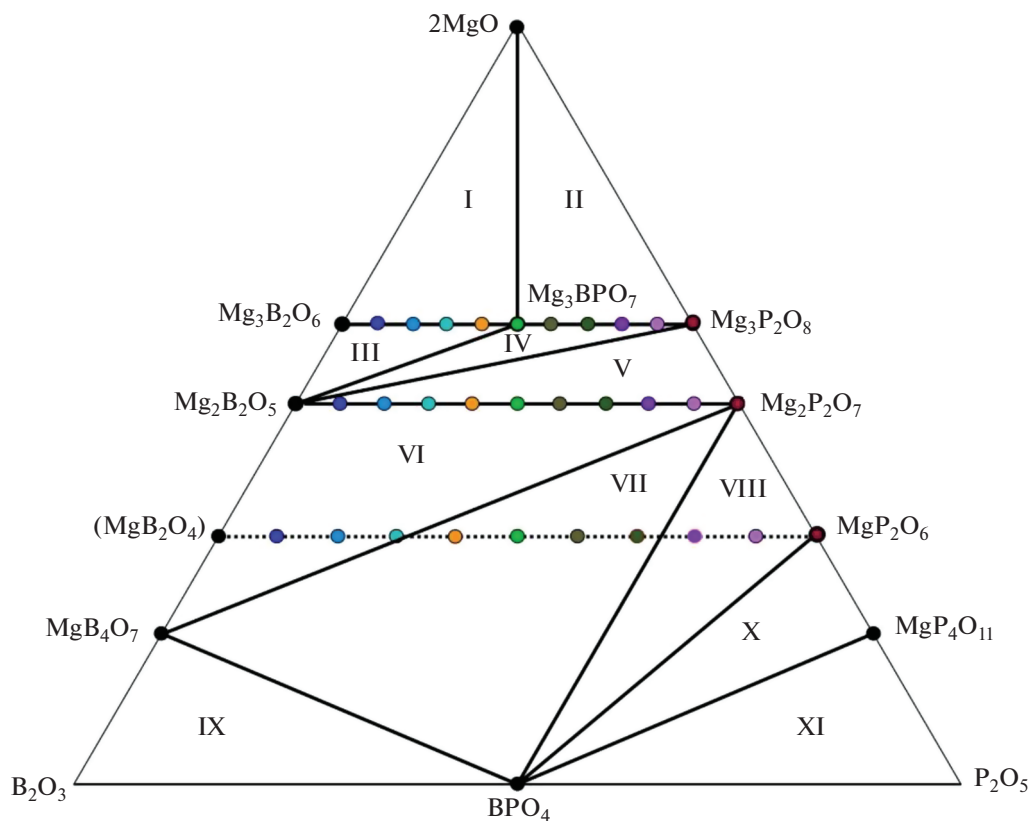


Рис. 6. Диаграмма стабильных субсолидусных фазовых равновесий системы $\text{MgO}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{P}_2\text{O}_5$.

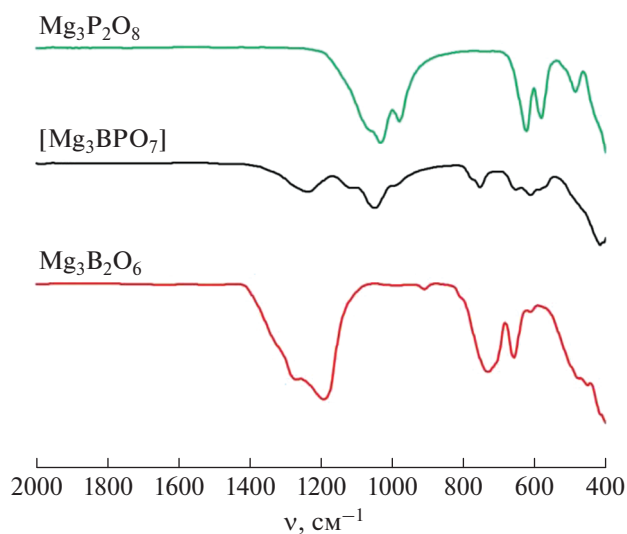


Рис. 7. ИК-спектры $\text{Mg}_3\text{B}_2\text{O}_6$, $\text{Mg}_3\text{P}_2\text{O}_8$, а также образца, в котором доминирует фаза Mg_3BPO_7 .

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания ИОНХ РАН.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aziz S.M., Umar R., Yusoff N.B.M. et al. // Malaysian J. Fundam. Appl. Sci. 2020. V. 16. № 4. P. 524.
2. Qiu K., Xu S.-C., Tian H. et al. // Optoelectron. Lett. 2011. V. 7. № 5. P. 0350. <https://doi.org/10.1007/s11801-011-1030-y>
3. Zhang J., Zhang X., Chen C. et al. // J. Mater. Sci. Mater. Electron. 2018. V. 29. № 8. P. 6543. <https://doi.org/10.1007/s10854-018-8636-9>
4. Kharabe V.R., Dhoble S.J., Moharil S.V. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2008. V. 41. № 20. P. 205413. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/41/20/205413>
5. Li W., Feng X., Duan C. et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2005. V. 38. № 3. P. 385. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/38/3/005>
6. Pan S., Wu Y., Fu P. et al. // Chem. Mater. 2003. V. 15. № 11. P. 2218. <https://doi.org/10.1021/cm020878k>
7. Qin C., Huang Y., Zhao W. et al. // Mater. Chem. Phys. 2010. V. 121. № 1–2. P. 286. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2010.01.037>

8. *Duan C.-J., Wu X.-Y., Li W.-F. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2005. V. 87. P. 201917-3
<https://doi.org/10.1063/1.2130728>
9. *Liebertz J., Stähr S.* // Z. Kristallogr. 1982. V. 160. P. 135.
10. *Gözel G., Baykal A., Kizilyalli M. et al.* // J. Eur. Ceram Soc. 1998. V. 18. № 14. P. 2241.
[https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(98\)00152-6](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(98)00152-6)
11. *Duan C.-J., Li W.-F., Wu X.-Y. et al.* // J. Lumin. 2006. V. 117. P. 83.
<https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2005.03.016>
12. *Wei Z., Lu Y., Li X. et al.* // J. Appl. Biomater. Funct. Mater. 2016. V. 14. Suppl. 1. P. S83.
<https://doi.org/10.5301/jabfm.5000320>
13. *Huang Y., Zhao W., Shi L. et al.* // J. Alloys. Compd. 2009. V. 477. № 1–2. P. 936.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.11.016>
14. *Zeng Q., Kilah N., Riley M.* // J. Limin. 2003. V. 101. № 3. P. 167.
[https://doi.org/10.1016/S0022-2313\(02\)00410-6](https://doi.org/10.1016/S0022-2313(02)00410-6)
15. *Kniep R., Gözel G., Eisenmamm B. et al.* // Angew. Chem. Int. Ed. Engl. 1994. V. 33. № 7. P. 749.
16. *Zhang Z.-J., Hu G.-Q., Wang H. et al.* // Mater. Res. Bull. 2014. V. 52. P. 70.
<https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2014.01.004>
17. *Kuo T.-W., Liu W.-R., Chen T.-M.* // Opt. Express. 2010. V. 18. № 3. P. 1888.
18. *Komatsu Y., Komeno A., Toda K. et al.* // J. Alloys. Compd. 2006. V. 408–412. P. 903.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2005.01.098>
19. *Sohn K.-S., Cho S.H., Park S.S. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 89. P. 051106-3.
<https://doi.org/10.1063/1.2245218>
20. *Wang F., Song H., Pan G. et al.* // J. Lumin. 2008. V. 128. № 12. P. 2013.
<https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2008.06.012>
21. *Kim H., Park K.* // J. Ceram. Proc. Res. 2014. V. 15. № 3. P. 162.
22. *Chen S.-H., Su J., Wang Y. et al.* // Calphad: Comp. Coupl. Phase Diagrams Thermochem. 2015. V. 51. P. 67.
<https://doi.org/10.1016/j.calphad.2015.07.004>
23. *Mutluer T., Timucin M.* // J. Am. Ceram. Soc. 1975. V. 58. № 5–6. P. 196.
<https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1975.tb11442.x>
24. *Guo G.C., Cheng W.D., Chen J.* // Acta Crystallogr., Sect. C: Crystal Structure Communications. 1995. V. 51. № 3. P. 351. <https://doi.org/https://doi.org/10.1107/s0108270194009303>
25. *Ding G.-H., Xie W., Jung I.-H.* // Acta Phys. Chem. Sin. 2015. V. 31. № 10. P. 1853.
<https://doi.org/10.3866/PKU.WHXB201508121>
26. *Ananthanarayanan K.P., Mohanty C., Gielisse P.J.* // J. Cryst. Growth. 1973. V. 20. P. 63.
[https://doi.org/10.1016/0022-0248\(73\)90038-9](https://doi.org/10.1016/0022-0248(73)90038-9)
27. *Schmidt M., Ewald B., Prots Yu. et al.* // Z. Anorg. Allg. Chem. 2004. V. 630. P. 655.
<https://doi.org/10.1002/zaac.200400002>
28. *Morkan A., Gul E., Morkan I. et al.* // Int. J. Appl. Ceram. Technol. 2018. V. 15. № 6. P. 1584.
<https://doi.org/10.1111/ijac.13024>
29. *Manajan R., Prakash R.* // Mater. Chem. Phys. 2020. V. 246. P. 122826.
<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.122826>
30. *Смирнова М.Н., Копьева М.А., Никуфорова Г.Е. и др.* // Журн. неорганической химии. 2021. Т. 66. № 12. С. 167.
<https://doi.org/10.31857/S0044457X21120187>