

SYNTHESIS AND STUDY OF LUMINESCENT CHARACTERISTICS OF GaBO₃: Yb³⁺

Y.A. Zholdas^{1*}, A.B. Kairova¹, A.B. Kuznetsov², A.M. Bakhadur¹, M.I. Rakhmanova³,
A.K. Bolatov¹, K.A. Kokh²

¹Center of Physical Chemical Methods of Research and Analysis, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

²Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Novosibirsk, Russia

³Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry, Novosibirsk, Russia

*E-mail: yerassylzholdas1996@gmail.com

Abstract. *Introduction.* Borates of rare earth elements attract attention due to their unique physical properties due to the peculiarities of their electronic structure and crystal lattice. Ytterbium orthoborates are of great practical importance in the field of infrared luminescence. *The aim of the work.* Investigation of the structure, phase composition and luminescent properties of GaBO₃-based solid solutions doped with ytterbium ions. *Methodology.* Ga_{1-x}Yb_xBO₃ (x = 0, 0.005, 0.01, 0.02, 0.03, 0.05, 0.06 and 1) were obtained by solid-phase synthesis. *Results and discussions.* SEM EDS analysis showed that ~1 mol.% Yb dissolves in GaBO₃ at a temperature of 700°C and ~2 mol.% Yb at temperatures of at 800 and 900°C. The results of diffusion experiments indicate that the maximum is ~2 mol.% of Yb ions can be dissolved in gallium borate. These data are consistent with the results of X-ray phase analysis, showing that the ytterbium content is over 2 mol.%, significant impurities and signs of incomplete synthesis are observed. *Conclusion.* The Ga_{0.995}Yb_{0.005}BO₃ and Ga_{0.99}Yb_{0.01}BO₃ compounds exhibit stable luminescent properties with broad peaks at 919 nm and 970 nm. These results highlight the potential of the materials for applications in optoelectronics and photonics.

Key words: crystal structure, phase composition, solid solutions, solid phase synthesis, X-ray phase analysis, rare earth borates, ytterbium, GaBO₃: Yb³⁺, doping, infrared luminescent material.

Zholdas Yerassyl Aidosuly	Researcher; E-mail: yerassylzholdas1996@gmail.com
Kairova Aigerim Berdigalikyzy	2 nd year PhD student; E-mail: aigerimkai2445@gmail.com
Kuznetsov Artem Borisovich	Candidate of Geologo and Mineralogical Sciences; E-mail: ku.artemy@igm.nsc.ru
Bakhadur Askar Mughtakuly	PhD, researcher; E-mail: askar.bakhadur@gmail.com
Rakhmanova Marianna Ivanovna	Candidate of Physical and Mathematical sciences; E-mail: rakhmanova_m@mail.ru
Bolatov Asset Kuanyshevich	PhD, Leading Researcher; E-mail: assetbolatov@gmail.com
Kokh Konstantin Aleksandrovich	Doctor of Geologo-Mineralogical Sciences; E-mail: k.kokh@g.nsu.ru

Citation: Zholdas Y.A., Kairova A.B., Kuznetsov A.B., Bakhadur A.M., Rakhmanova M.I., Bolatov A.K., Kokh K.A. Synthesis and study of luminescent characteristics of GaBO₃: Yb³⁺. *Chem. J. Kaz.*, **2024**, 4(88), 132-142. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.51580/2024-4.2710-1185.56>

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК GaVO₃: Yb³⁺

Е.А. Жолдас^{1*}, А.Б. Кайрова¹, А.Б. Кузнецов², А.М. Бахадур¹, М.И. Рахманова³,
А.К. Болатов¹, К.А. Кох²

¹Центр физико-химических методов исследования и анализа, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

²Институт геологии и минералогии имени В.С. Соболева, Новосибирск, Россия

³Институт неорганической химии имени А.В. Николаева, Новосибирск, Россия

*E-mail: yerassylzholdas1996@gmail.com

Резюме. Введение. Бораты редкоземельных элементов привлекают внимание благодаря уникальным физическим свойствам, обусловленным особенностями их электронной структуры и кристаллической решетки. Ортобораты иттербия имеют важное практическое значение в области инфракрасной люминесценции. Цель. Исследование структуры, фазового состава и люминесцентных свойств твердых растворов на основе GaVO₃, легированных ионами иттербия. Методология. Методом твердофазного синтеза были получены Ga_{1-x}Yb_xVO₃ (x = 0, 0.005, 0.01, 0.02, 0.03, 0.05, 0.06 и 1). Результаты и обсуждение. Анализ СЭМ ЭДС показал, что в GaVO₃ растворяется ~1 мол.% Yb при температуре 700°C и ~2 мол.% Yb при температурах 800 и 900°C. Результаты диффузионных экспериментов свидетельствуют о том, что максимум ~2 мол.% ионов Yb может растворяться в борате галлия. Эти данные согласуются с результатами рентгенофазового анализа, показывающими, что при содержании иттербия свыше 2 мол.% наблюдаются значительные примеси и признаки неполного протекания синтеза. Заключение. Соединения Ga_{0.995}Yb_{0.005}VO₃ и Ga_{0.99}Yb_{0.01}VO₃ проявляют стабильные люминесцентные свойства с широкими пиками на 919 нм и 970 нм. Эти результаты подчеркивают перспективы материалов для применения в оптоэлектронике и фотонике.

Ключевые слова: кристаллическая структура, фазовый состав, твердые растворы, твердофазный синтез, рентгенофазовый анализ, редкоземельные бораты, иттербий, GaVO₃: Yb³⁺, легирование, инфракрасный люминесцентный материал.

<i>Жолдас Ерасыл Айдосұлы</i>	<i>научный сотрудник</i>
<i>Кайрова Айгерим Бердигалиқызы</i>	<i>докторант 1-курса</i>
<i>Кузнецов Артем Борисович</i>	<i>кандидат геолого-минералогических наук</i>
<i>Бахадур Аскар Мухтарұлы</i>	<i>PhD, научный сотрудник</i>
<i>Рахманова Мариана Ивановна</i>	<i>кандидат физико-математических наук</i>
<i>Болатов Асет Куанышевич</i>	<i>PhD, ведущий научный сотрудник</i>
<i>Кох Константин Александрович</i>	<i>доктор геолого-минералогических наук</i>

1. Введение

Бораты редкоземельных элементов привлекают значительное внимание исследователей благодаря широкому спектру физических свойств, который обусловлен уникальными особенностями их электронной структуры и кристаллической решетки [1-4]. Среди этих соединений выделяются ортобораты иттербия, которые имеют важное практическое значение [5, 6]. Для энергетических уровней ионов Yb³⁺ выделяется единственный переход ²F_{5/2} → ²F_{7/2}, соответствующий излучению в диапазоне 900 – 1000 нм [7]. Это излучение, в сочетании с временами жизни возбужденных состояний,

достигающими нескольких миллисекунд, делает данные соединения особенно привлекательными для различных применений, как лазерная обработка материалов, медицина, телекоммуникации и научные исследования [8-11].

Исследования, направленные на поиск подходящих матриц для допирования среди ортоборатов трёхвалентных металлов, зачастую сосредоточены преимущественно на боратных соединениях редкоземельных элементов (РЗЭ), таких как Y, In и Bi [12-14]. Однако в этой области существует значительный пробел: соединения с участием металлов с меньшими ионными радиусами, таких как Al, Ga и Sc, почти не представлены в научной литературе. Только в редких случаях можно встретить упоминания о таких материалах, как смешанные ортобораты типа $\text{LnM}_3(\text{BO}_3)_4$ [15] и $\text{YbGa}(\text{BO}_3)_2$ [16]. Несмотря на их потенциальную перспективность, эти соединения остаются недостаточно изученными.

В данной работе представлены результаты комплексного исследования системы $\text{YbVO}_3 - \text{GaVO}_3$. Основное внимание уделено изучению фазового состава и особенностям синтеза однофазных образцов. Таким образом, расширение исследований на соединения с галлием может не только обогатить фундаментальные знания в области химии и материаловедения, но и предложить новые решения для практических приложений в высокотехнологичных отраслях, таких как оптоэлектроника, лазерная техника и сенсорные технологии.

2. Экспериментальная часть

Соединения $\text{Ga}_{1-x}\text{Yb}_x\text{VO}_3$ ($x = 0, 0.005, 0.01, 0.02, 0.03, 0.05, 0.06$ и 1) были синтезированы методом твердофазной реакции. Стехиометрически рассчитанные количества высокочистых исходных веществ Ga_2O_3 , Yb_2O_3 и H_3BO_3 были взвешены на аналитических весах, тщательно перемешаны и измельчены в яшмовой ступке. Важно отметить, что при синтезе $\text{Ga}_{1-x}\text{Yb}_x\text{VO}_3$ ($x = 0, 0.005, 0.01, 0.02, 0.03, 0.05$ и 0.06) в смесь было добавлено 10% борной кислоты от общей массы реагентов для компенсации улетучивания V_2O_5 при высоких температурах.

Полученную смесь прокаливали в платиновом тигле при температуре 550°C в течение 12 часов. Затем смесь повторно перемешивали и подвергали прокалке при температуре 700°C (для GaVO_3) и 900°C (для YbVO_3). Для смешанных образцов $\text{Ga}_{1-x}\text{Yb}_x\text{VO}_3$ ($x = 0.005, 0.01, 0.02, 0.03, 0.05$ и 0.06) после первого этапа проводили два последовательных отжига с перемешиванием при температурах 700 и 850°C , каждый продолжительностью 12 часов. По окончании 12-часового нагрева образцы быстро охлаждали на воздухе. Полнота протекания реакции контролировалась рентгенофазовым анализом.

Фазовый анализ полученных соединений был выполнен методом рентгеновской дифракции на порошке с использованием дифрактометра Брегга-Брентано TD-3700 (Tongda, Китай) с применением $\text{CuK}\alpha$ излучения.

Диапазон сканирования составлял от 10° до 60° с шагом 0.02° на шаг сканирования.

Для более точного изучения ширины областей гомогенности были проведены диффузионные эксперименты путем отжига спрессованных двухкомпонентных таблеток, состоящих из GaVO_3 и YbVO_3 . Методика заключалась в следующем: синтезированные методом твердофазного синтеза соединения GaVO_3 и YbVO_3 были измельчены в яшмовой ступке в течение 3 минут. Из этой смеси были спрессованы таблетки диаметром 10 мм под давлением до 1 т/см^2 . Полученные таблетки отжигали при температурах 700, 800 и 900°C в течение 12 часов. После чего полученные образцы заливались эпоксидной смолой и изучались с помощью сканирующей электронной микроскопии. Химические составы были измерены методом сканирующей электронной микроскопии с приставкой для энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (СЭМ ЭДС) на приборе MIRA 3LMU (TESCAN, Чехия). Спектры возбуждения и испускания однофазных соединений были зарегистрированы с использованием спектрофлуориметра Horiba Fluorolog3, который оснащен непрерывными 450 Вт и импульсными ксеноновыми лампами в качестве источников света.

3. Результаты и обсуждения

На рисунке 1а представлены рентгеновские дифрактограммы полученных соединений $\text{Ga}_{1-x}\text{Yb}_x\text{VO}_3$ ($x = 0, 0.005, 0.01, 0.02$ и 0.05) и расчетная дифрактограмма GaVO_3 [17]. При синтезе чистого соединения GaVO_3 были обнаружены пики, соответствующие Ga_2O_3 (* на рисунке 1а). Добавка 10% борной кислоты от общей массы реагентов позволила получить чистое соединение GaVO_3 при температуре 700°C .

Согласно дифрактограммам соединений $\text{Ga}_{1-x}\text{Yb}_x\text{VO}_3$ ($x = 0.005, 0.01, 0.02$ и 0.05) после отжига при температуре 700°C (рисунок 1а), было зафиксировано множество примесных пиков, соответствующих Ga_2O_3 , что указывает на неполное завершение синтеза. Также на дифрактограммах $\text{Ga}_{1-x}\text{Yb}_x\text{VO}_3$ ($x = 0.005, 0.01, 0.02$ и 0.05) наблюдаются пики бората иттербия (* на рисунке 1а), интенсивность которых увеличивается с ростом содержания иттербия, при этом пики постепенно смещаются в сторону меньших углов с увеличением концентрации Yb^{3+} в образце. Учитывая наличие пиков оксида галлия в образцах, было принято решение повысить температуру синтеза до температуры 850°C . Второй этап заключался в отжиге образцов $\text{Ga}_{1-x}\text{Yb}_x\text{VO}_3$ ($x = 0.005, 0.01, 0.03$ и 0.06) при температуре 850°C (рисунок 1б). На основании данных рентгенофазового анализа можно сделать вывод, что были получены чистые соединения $\text{Ga}_{1-x}\text{Yb}_x\text{VO}_3$ ($x = 0.005$ и 0.01). Кристаллическая структура этих соединений остается практически неизменной и изоструктурна GaVO_3 , при этом наблюдаются заметные сдвиги всех дифракционных пиков в сторону меньших углов с увеличением концентрации ионов Yb^{3+} . В дифрактограммах $\text{Ga}_{1-x}\text{Yb}_x\text{VO}_3$ ($x = 0.03$ и 0.06)

наблюдаются пики бората иттербия (* на рисунке 1б). При увеличении концентрации иттербия интенсивность этих пиков возрастает, и они постепенно смещаются в сторону меньших углов с увеличением содержания ионов Yb^{3+} .

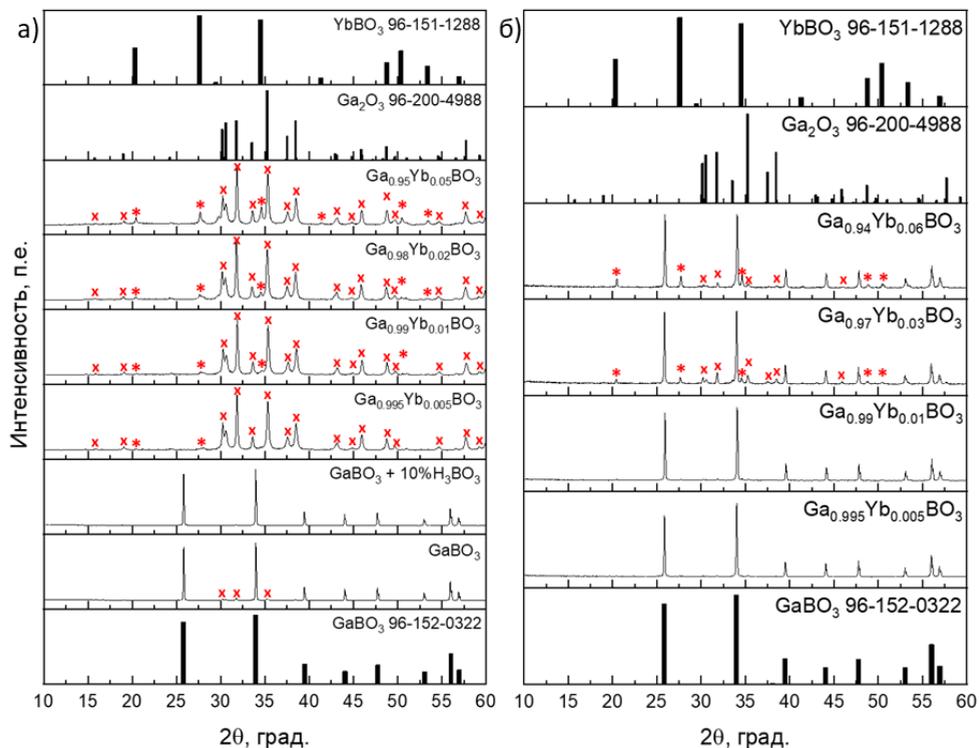


Рисунок 1 - Дифрактограммы $\text{Ga}_{1-x}\text{Yb}_x\text{BO}_3$ ($x = 0, 0.005, 0.01, 0.02, 0.03, 0.05$ и 0.06) после отжига при температурах: а) 700°C и б) 850°C (x – Ga_2O_3 и * – YbBO_3).

Также была проверена теория существования соединения $\text{YbGa}_3(\text{BO}_3)_4$. По результатам рентгенофазового анализа образца (рисунок 2), синтезированного при данном соотношении реагентов, были зафиксированы фазы Ga_2O_3 (x на рисунке 2), Yb_2O_3 (0 на рисунке 2) и YbBO_3 (* на рисунке 2). Образование новой фазы, предполагаемой как $\text{YbGa}_3(\text{BO}_3)_4$, не выявлено. Следует отметить, что по мере увеличения температуры интенсивность пиков Yb_2O_3 снижается. При достижении температуры до 900°C на дифрактограмме появляются новые пики (1 на рисунке 2), отсутствующие на низкотемпературных этапах. Эти пики могут указывать на возможное формирование фазы $\text{YbGa}(\text{BO}_3)_2$, поскольку её существование предположено авторами [16] на основании данных ИК-спектроскопии, хотя дифрактограммы этого соединения в доступных источниках отсутствуют.

Для получения более точной информации о составах фаз были проведены диффузионные эксперименты. Эксперименты включали отжиг

двухкомпонентных таблеток, состоящих из соединений GaBO_3 и YbVO_3 , которые были предварительно синтезированы при температурах 700 и 900°C соответственно. Анализ СЭМ ЭДС показал, что в GaBO_3 растворяется ~1 мол.% Yb при температуре 700°C и ~2 мол.% Yb при температурах 800 и 900°C (рисунок 3). Результаты диффузионных экспериментов свидетельствуют о том, что максимум ~2 мол.% ионов Yb может растворяться в борате галлия. Эти данные согласуются с результатами рентгенофазового анализа, которые показывают, что в синтезированных соединениях при легировании ионами иттербия свыше 2 мол.% наблюдаются значительные примеси, а также указывает на признаки неполного протекания синтеза. Согласно данным РФА и диффузионных экспериментов только соединения с 0.5 и 1 мол.% Yb являются твердыми растворами на основе GaBO_3 . Тогда как все другие полученные соединения представлены смесью фаз.

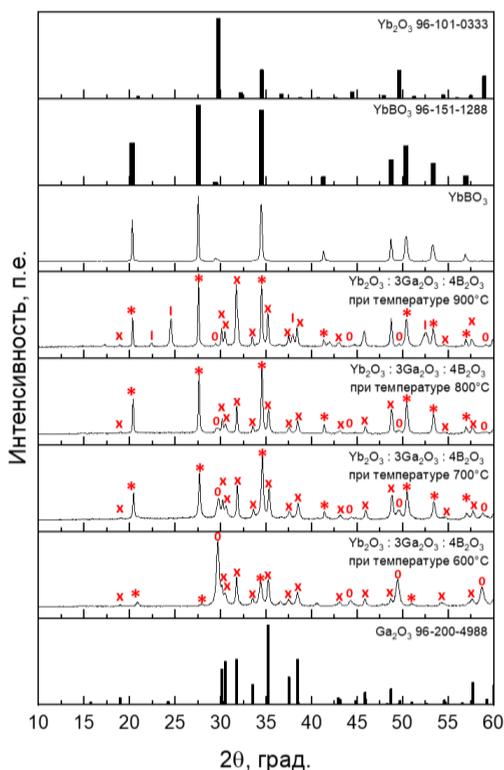


Рисунок 2 - Дифрактограммы: а) $\text{YbGa}_3(\text{BO}_3)_4$ и б) YbVO_3
 (x – Ga_2O_3 , o – Yb_2O_3 , * – YbVO_3 и I – $\text{YbGa}(\text{BO}_3)_2$).

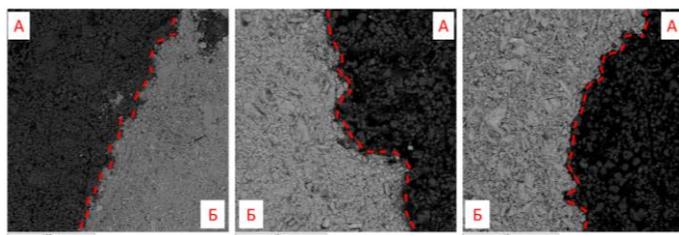


Рисунок 3 - Фотографии фазовых контактов GaBO_3 (А) и YbBO_3 (Б) при температурах 700, 800 и 900°C, полученные с помощью СЭМ

Для $\text{Ga}_{0.995}\text{Yb}_{0.005}\text{BO}_3$ и $\text{Ga}_{0.99}\text{Yb}_{0.01}\text{BO}_3$ были изучены спектры возбуждения фотолюминесценции (СВЛ) и фотолюминесценции (СЛ) (рисунок 4). СВЛ образцов $\text{Ga}_{0.995}\text{Yb}_{0.005}\text{BO}_3$ и $\text{Ga}_{0.99}\text{Yb}_{0.01}\text{BO}_3$ демонстрируют широкий пик в диапазоне длин волн 875 – 920 нм с максимумом на 919 нм. Эти пики обусловлены переходами электронов с подуровня ${}^2\text{F}_{7/2}$ в возбужденное состояние ${}^2\text{F}_{5/2}$, что характерно для ионов Yb^{3+} . Интересно, что интенсивности спектров для обоих образцов различаются незначительно, оставаясь в пределах экспериментальной погрешности. Этот факт указывает на стабильность и воспроизводимость механизмов переноса энергии в данных материалах, несмотря на различие в концентрации иттербия.

СЛ образцов $\text{Ga}_{0.995}\text{Yb}_{0.005}\text{BO}_3$ и $\text{Ga}_{0.99}\text{Yb}_{0.01}\text{BO}_3$ характеризуются наличием широкого пика в диапазоне длин волн 950 – 1000 нм, с ярко выраженным максимумом на уровне 970 нм. Этот пик обусловлен электронными переходами с подуровня в возбужденном состоянии ${}^2\text{F}_{5/2}$ на первый подуровень в основном состоянии ${}^2\text{F}_{7/2}$ ионов Yb^{3+} , что является характерной чертой для таких материалов.

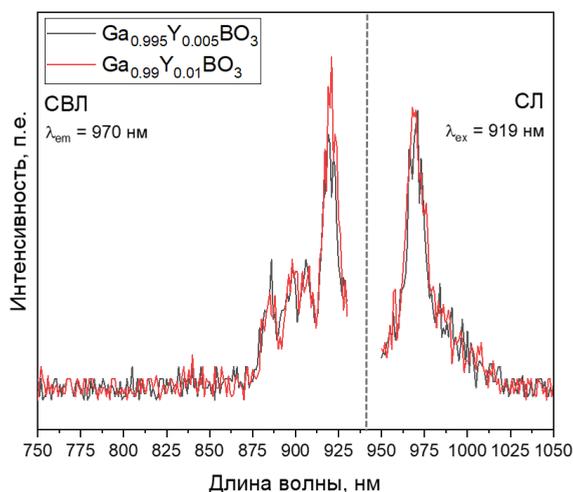


Рисунок 4 - СВЛ и СЛ $\text{GaBO}_3: x\text{Yb}$ ($x = 0.005$ и 0.01).

4. Заключение

Результаты исследований продемонстрировали, что соединения $Ga_{1-x}Yb_xVO_3$ ($x = 0.005$ и 0.01) являются твердыми растворами на основе $GaVO_3$, что подтверждается данными РФА и диффузионных экспериментов. Несмотря на близость ионных радиусов Yb и Ga (0.868\AA и 0.620\AA в VI координации соответственно [18]), изоморфизм между ними ограничен и составляет не более 2% в структуре $GaVO_3$. Соединения $Ga_{0.995}Yb_{0.005}VO_3$ и $Ga_{0.99}Yb_{0.01}VO_3$, полученные в ходе синтеза, проявляют стабильные и воспроизводимые люминесцентные свойства. Они демонстрируют широкие пики на СВЛ и СЛ с максимумами на 919 нм и 970 нм соответственно.

Финансирование. Работа была выполнена при финансовой поддержке гранта МНВО РК «Кристаллохимия и оптические свойства функциональных ортоборатов иттербия» [ИРН AP19575956]; государственного задания ИГМ СО РАН № 122041400031-2.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов между авторами, требующего раскрытия в данной статье.

$GaVO_3$: Yb^{3+} СИНТЕЗИ ЖӘНЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТТІ СИПАТТАМАЛАРЫН ЗЕРТТЕУ

Е.А. Жолдас^{1*}, А.Б. Кайрова¹, А.Б. Кузнецов², А.М. Бахадур¹, М.И. Рахманова³,
А.К. Болатов¹, К.А. Кох²

¹Физика-химиялық зерттеу және талдау әдістері орталығы, әл-Фараби атындағы қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

²В.С. Соболев атындағы геология және минералогия институты, Жаңасібір, Ресей

³А.В. Николаев атындағы бейорганикалық химия институты, Жаңасібір, Ресей

*E-mail: yerassylzholdas1996@gmail.com

Түйіндемe. *Кіріспе.* Сирекжер элементтерінің бораттары электронды құрылым мен кристалдық тор ерекшеліктеріне байланысты бірегей физикалық қасиеттерімен зерттеушілердің назарын аударады. Иттербийдің ортобораттары инфрақызыл люминесценция саласында маңызды практикалық маңызға ие. *Жұмыс мақсаты.* Иттербий иондарымен легирленген $GaVO_3$ негізіндегі қатты ерітінділердің құрылымын, фазалық құрамын және люминесценттік қасиеттерін зерттеу. *Әдістер.* $Ga_{1-x}Yb_xVO_3$ қосылыстары ($x = 0, 0.005, 0.01, 0.02, 0.03, 0.05, 0.06$ және 1) қатты фазалық синтез арқылы алынды. *Нәтижелер мен талқылаулар.* ЭДТ СЭМ нәтижесі бойынша $GaVO_3$ -те 700°C температурада ~1 мол.% Yb және 800 және 900°C температураларда ~2 мол.% Yb ерігенін көрсетті. Диффузиялық тәжірибелердің нәтижелері галлий боратында максимум ~2 мол.% Yb иондарын ерітуге болатынын көрсетеді. Бұл мәліметтер иттербийдің мөлшері 2 мол.%-дан жоғары болған кезде елеулі қоспалар және толық емес синтез белгілері байқалатынын көрсететін рентгенфазалық талдау нәтижелерімен сәйкес келеді. *Қорытынды.* $Ga_{0.995}Yb_{0.005}VO_3$ және $Ga_{0.99}Yb_{0.01}VO_3$ қосылыстары 919 нм- және 970 нм-де кең шындары бар тұрақты люминесценттік қасиеттерді көрсетеді. Бұл нәтижелер материалдардың оптоэлектроника мен фотоникада қолдану мүмкіндіктерін айқындайды.

Түйін сөздер: кристалдық құрылым, фазалық құрам, қатты ерітінділер, қатты фазалық синтез, рентгенфазалық талдау, сирекжер бораттары, иттербий, $GaVO_3$: Yb^{3+} , легирлеу, инфрақызыл люминесцентті материал.

Жолдас Ерасыл Айдосұлы

Ғылыми қызметкер

Кайрова Айгерим Бердигалиқызы

1-курс докторанты

Кузнецов Артем Борисович	Геология-минералогия ғылымдарының кандидаты
Бахадур Аскар Мұхтарұлы	PhD, ғылыми қызметкер
Рахманова Мариана Ивановна	Физика-математика ғылымдарының кандидаты
Болатов Асет Қуанышевич	PhD, жетекші ғылыми қызметкер
Кох Константин Александрович	Геология-минералогия ғылымдарының докторы

Список литературы:

1. Kuznetsov, A.B., Kokh, K.A., Kaneva, E.V., Jamous, A.Y., Svetlichnyi, V.A., Kononova, N.G., Goreiavcheva A.A, Kokh, A.E. Systematic rare Earth doping to adopt an R32 type huntite structure in NdSc₃(BO₃)₄ crystals. *Dalt. Trans.*, **2024**, 53(8), 3818-3824. <https://doi.org/10.1039/D3DT03942K>.
2. Gupta, I., Singh, S., Bhagwan, S., Singh, D. Rare earth (RE) doped phosphors and their emerging applications: A review. *Ceram. Int.*, **2021**, 47(14), 19282-19303. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.03.308>.
3. Münchhalden, M., Schreuer, J., Reuther, C., Mehner, E., Stöcker, H. Elastic, piezoelectric, and dielectric properties of rare-earth calcium oxoborates RCa₄O (BO₃)₃ (R= Er, Y, Dy, Gd, Sm, Nd, La). *J. Appl. Phys.*, **2021**, 130(9). <https://doi.org/10.1063/5.0061747>.
4. Zhang, N., Han, S.S., Xie, Y., Chen, D.L., Yao, W.D., Huang, X., Liu, W., Guo, S.P. Mixed Rare-Earth Chalcogenide Borate Eu_{9-x}RE_xMgS₂B₂₀O₄₁ (RE= Sm, Gd) Featuring a 3D {[B₂₀O₄₁]²²⁻}_∞ Framework Connected by [B₆O₉(O_{0.5})₆]⁶⁻ and [B₇O₁₃(O_{0.5})₃]⁸⁻ Clusters. *Inorg. Chem.*, **2023**, 62(20), 7681-7688. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.2c04272>.
5. Kuznetsov, A.B., Jamous, A.Y., Svetlichnyi, V.A., Shevchenko, V.S., Kokh, A.E., Andreev, Y.M., Kokh, K.A. Luminescence Properties of Solid-Solutions in Sr₃B₂O₆-YbBO₃ System. *J. Struct. Chem.*, **2024**, 65(8), 1502-1512. <http://dx.doi.org/10.1134/S0022476624080031>.
6. Kuznetsov, A.B., Kokh, K.A., Sagatov, N., Gavryushkin, P.N., Molokeev, M.S., Svetlichnyi, V.A., Lapin, I.N., Kononova, N.G., Shevchenko, V.S., Bolatov, A.K., Uralbekov, B.M., Goreiavcheva, A.A., Kokh, A.E. Synthesis and growth of rare earth borates NaSrR(BO₃)₂ (R= Ho-Lu, Y, Sc). *Inorg. Chem.*, **2022**, 61(19), 7497-7505. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.2c00596>.
7. Lengyel, K., Tichy-Rács, É., Timpmann, K., Vielhauer, S., Romet, I., Kovács, L., Corradi, G., Butkus, R., Vengris, M., Grigonis, R., Sirutkaitis, V., Sildos, I., Kiisk, V., Puust, L., Nagirnyi, V. Cooperative luminescence of Yb³⁺ ion pairs in Li₆Y(BO₃)₃: Yb single crystals. *J. Lumin.*, **2021**, 230, 117732. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2020.117732>.
8. Druon, F., Chenais, S., Raybaut, P., Balembois, F., Georges, P., Gaume, R., Aka, G., Viana, B., Mohr, S., Kopf, D. Diode-pumped Yb: Sr₃Y(BO₃)₃ femtosecond laser. *Opt. Lett.*, **2002**, 27(3), 197-199. <https://doi.org/10.1364/OL.27.000197>.
9. Dekker, P., Dawes, J.M., Piper, J.A. 2.27-W Q-switched self-doubling Yb: YAB laser with controllable pulse length. *J. Opt. Soc. Am. B.*, **2005**, 22(2), 378-384. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.22.000378>.
10. Chaika, M., Tomala, R., Streck, W. Laser induced broadband Vis and NIR emission from Yb: YAG nanopowders. *J. Alloys Compd.*, **2021**, 865, 158957. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.158957>.
11. Grabtchikov, A.S., Kuzmin, A.N., Lisinetskii, V.A., Orlovich, V.A., Demidovich, A.A., Danailov, M.B., Eichler, H.J., Bednarkiewicz A., Streck W., Titov, A.N. Laser operation and Raman self-frequency conversion in Yb: KYW microchip laser. *Appl. Phys. B.*, **2002**, 75, 795-797. <https://doi.org/10.1007/s00340-002-1025-2>.
12. Srivastava, S., Behera, S.K., Nayak, B.B. Optimization and photoluminescence behaviour of terbium doped YBO₃ phosphors. *Opt. Mater.*, **2020**, 107, 110178. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2020.110178>.
13. Shi, M., Shao, Q., Yao, L., Yu, S., Dong, Y., Jiang, J. Molten salt synthesis of broad-band near-infrared InBO₃: Cr³⁺ submicron phosphor and its luminescent enhancement by lanthanide ion codoping. *Inorg. Chem.*, **2022**, 61(31), 12275-12283. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.2c01477>.

14. Cheng, Y., Xiao, H., Guo, W. Influences of La³⁺ and Er³⁺ on structure and properties of Bi₂O₃–B₂O₃ glass. *Ceram. Int.*, **2008**, 34(5), 1335-1339. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2007.03.028>.
15. Kuz'micheva, G.M., Kaurova, I.A., Rybakov, V.B., Podbel'skiy, V.V. Crystallochemical design of huntite-family compounds. *Crystals.*, **2019**, 9(2), 100. <https://doi.org/10.3390/cryst9020100>.
16. Beregi, E., Watterich, A., Madarász, J., Tóth, M., Polgár, K. X-ray diffraction and FTIR spectroscopy of heat treated R₂O₃:3Ga₂O₃:4B₂O₃ systems. *J. Cryst. Growth.*, **2002**, 237, 874-878. [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(01\)02042-5](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(01)02042-5).
17. Wang, S., Ye, N., Poeppelmeier, K.R. Flux growth and crystal structure refinement of calcite type borate GaBO₃. *Crystals.*, **2015**, 5(2), 252-260. <https://doi.org/10.3390/cryst5020252>.
18. Shannon, R.D. Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides. *Acta Crystallogr. Sect. A.*, **1976**, 32(5), 751-767. <https://doi.org/10.1107/S0567739476001551>.

References

1. Kuznetsov, A.B., Kokh, K.A., Kaneva, E.V., Jamous, A.Y., Svetlichnyi, V.A., Kononova, N.G., Goreiavcheva A.A., Kokh, A.E. Systematic rare Earth doping to adopt an R32 type huntite structure in NdSc₃(BO₃)₄ crystals. *Dalt. Trans.*, **2024**, 53(8), 3818-3824. <https://doi.org/10.1039/D3DT03942K>.
2. Gupta, I., Singh, S., Bhagwan, S., Singh, D. Rare earth (RE) doped phosphors and their emerging applications: A review. *Ceram. Int.*, **2021**, 47(14), 19282-19303. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.03.308>.
3. Münchhelfen, M., Schreuer, J., Reuther, C., Mehner, E., Stöcker, H. Elastic, piezoelectric, and dielectric properties of rare-earth calcium oxoborates RCa₄O (BO₃)₃ (R= Er, Y, Dy, Gd, Sm, Nd, La). *J. Appl. Phys.*, **2021**, 130(9). <https://doi.org/10.1063/5.0061747>.
4. Zhang, N., Han, S.S., Xie, Y., Chen, D.L., Yao, W.D., Huang, X., Liu, W., Guo, S.P. Mixed Rare-Earth Chalcogenide Borate Eu_{9-x}RE_xMgS₂B₂₀O₄₁ (RE= Sm, Gd) Featuring a 3D {[B₂₀O₄₁]²²⁻}_∞ Framework Connected by [B₆O₅(O_{0.5})₆]⁶⁻ and [B₇O₁₃(O_{0.5})₃]⁸⁻ Clusters. *Inorg. Chem.*, **2023**, 62(20), 7681-7688. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.2c04272>.
5. Kuznetsov, A.B., Jamous, A.Y., Svetlichnyi, V.A., Shevchenko, V.S., Kokh, A.E., Andreev, Y.M., Kokh, K.A. Luminescence Properties of Solid-Solutions in Sr₃B₂O₆–YbBO₃ System. *J. Struct. Chem.*, **2024**, 65(8), 1502-1512. <http://dx.doi.org/10.1134/S0022476624080031>
6. Kuznetsov, A.B., Kokh, K.A., Sagatov, N., Gavryushkin, P.N., Molokeev, M.S., Svetlichnyi, V.A., Lapin, I.N., Kononova, N.G., Shevchenko, V.S., Bolatov, A.K., Uralbekov, B.M., Goreiavcheva, A.A., Kokh, A.E. Synthesis and growth of rare earth borates NaSrR(BO₃)₂ (R= Ho–Lu, Y, Sc). *Inorg. Chem.*, **2022**, 61(19), 7497-7505. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.2c00596>.
7. Lengyel, K., Tichy-Rács, É., Timpmann, K., Vielhauer, S., Romet, I., Kovács, L., Corradi, G., Butkus, R., Vengris, M., Grigonis, R., Sirutkaitis, V., Sildos, I., Kiisk, V., Puust, L., Nagirnyi, V. Cooperative luminescence of Yb³⁺ ion pairs in Li₆Y(BO₃)₃: Yb single crystals. *J. Lumin.*, **2021**, 230, 117732. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2020.117732>.
8. Druon, F., Chenais, S., Raybaut, P., Balembois, F., Georges, P., Gaume, R., Aka, G., Viana, B., Mohr, S., Kopf, D. Diode-pumped Yb: Sr₃Y(BO₃)₃ femtosecond laser. *Opt. Lett.*, **2002**, 27(3), 197-199. <https://doi.org/10.1364/OL.27.000197>.
9. Dekker, P., Dawes, J.M., Piper, J.A. 2.27-W Q-switched self-doubling Yb: YAB laser with controllable pulse length. *J. Opt. Soc. Am. B.*, **2005**, 22(2), 378-384. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.22.000378>.
10. Chaika, M., Tomala, R., Streck, W. Laser induced broadband Vis and NIR emission from Yb: YAG nanoparticles. *J. Alloys Compd.*, **2021**, 865, 158957. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.158957>.
11. Grabtchikov, A.S., Kuzmin, A.N., Lisinetskii, V.A., Orlovich, V.A., Demidovich, A.A., Danailov, M.B., Eichler, H.J., Bednarkiewicz, A., Streck, W., Titov, A.N. Laser operation and Raman self-frequency conversion in Yb: KYW microchip laser. *Appl. Phys. B.*, **2002**, 75, 795-797. <https://doi.org/10.1007/s00340-002-1025-2>.
12. Srivastava, S., Behera, S.K., Nayak, B.B. Optimization and photoluminescence behaviour of terbium doped YBO₃ phosphors. *Opt. Mater.*, **2020**, 107, 110178. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2020.110178>.

13. Shi, M., Shao, Q., Yao, L., Yu, S., Dong, Y., Jiang, J. Molten salt synthesis of broad-band near-infrared InBO_3 : Cr^{3+} submicron phosphor and its luminescent enhancement by lanthanide ion codoping. *Inorg. Chem.*, **2022**, 61(31), 12275-12283. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.2c01477>.
14. Cheng, Y., Xiao, H., Guo, W. Influences of La^{3+} and Er^{3+} on structure and properties of Bi_2O_3 - B_2O_3 glass. *Ceram. Int.*, **2008**, 34(5), 1335-1339. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2007.03.028>.
15. Kuz'micheva, G.M., Kaurova, I.A., Rybakov, V.B., Podbel'skiy, V.V. Crystallochemical design of huntite-family compounds. *Crystals.*, **2019**, 9(2), 100. <https://doi.org/10.3390/cryst9020100>.
16. Beregi, E., Watterich, A., Madarász, J., Tóth, M., Polgár, K. X-ray diffraction and FTIR spectroscopy of heat treated R_2O_3 : $3\text{Ga}_2\text{O}_3$: $4\text{B}_2\text{O}_3$ systems. *J. Cryst. Growth.*, **2002**, 237, 874-878. [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(01\)02042-5](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(01)02042-5).
17. Wang, S., Ye, N., Poeppelmeier, K.R. Flux growth and crystal structure refinement of calcite type borate GaBO_3 . *Crystals.*, **2015**, 5(2), 252-260. <https://doi.org/10.3390/cryst5020252>.
18. Shannon, R.D. Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides. *Acta Crystallogr. Sect. A.*, **1976**, 32(5), 751-767. <https://doi.org/10.1107/S0567739476001551>