

УДК 546.(776+881.5)

*К.В. Тереміленко <sup>а</sup>, О.В. Петренко <sup>а</sup>, І.І. Токменко <sup>б</sup>, М.С. Слободяник <sup>а</sup>***КРИСТАЛОХІМІЧНІ АСПЕКТИ ІЗОМОРФІЗМУ В СИСТЕМІ  $\text{Na}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{MoO}_4\text{-BiVO}_4$** <sup>а</sup> Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна<sup>б</sup> Національний медичний університет імені О.О. Богомольця, Київ, Україна

Для бінарного розрізу  $x\text{Na}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{MoO}_4\text{-(1-x)BiVO}_4$  встановлено існування ідеального ізоморфізму в межах  $x=0,1\text{-}0,9$  з формуванням твердих розчинів загального складу  $\text{Na}_{0,5x}\text{Bi}_{1-0,5x}(\text{Mo}_x\text{V}_{1-x})\text{O}_4$ , що належать до структурного типу шееліту і кристалізуються у тетрагональній сингонії, просторовій групі  $I4_1/a$ . Методом твердофазної взаємодії одержано всі представники твердих розчинів наведеного складу з розміром зерна  $0,5\text{-}5,0$  мкм, причому при зростанні величини  $x$  за даними скануючої електронної мікроскопії розмір зерна збільшується до середнього значення 5 мкм. Методом ІЧ спектроскопії та рентгенографії порошку показано, що молібден та ванадій займають одну кристалографічну позицію зі статистичним розподілом по ній в межах заміщення  $x=0,1\text{-}0,9$  зі збереженням симетрії каркасу. Компенсація заряду реалізується завдяки пропорційному заміщенню в поліедри бісмуту на змішані  $(\text{Na}/\text{Bi})\text{O}_8$  поліедри. При збільшенні вмісту молібдену у складі твердих розчинів відбувається пропорційне збільшення об'єму елементарної комірки відповідних кристалічних каркасів структурного типу шееліт, що ілюструє правило Вегарда для випадку ідеального ізоморфізму. За даними спектроскопії дифузного відбиття показано, що при зростанні величини заміщення  $x$  також відбувається пропорційне збільшення ширини забороненої зони від 2,28 до 2,67 еВ для одержаних напівпровідників, що дозволяє розглядати їх як перспективні катализатори фотолізу води.

**Ключові слова:** шееліт, молібден, ванадій, бісмут, ізоморфізм, твердий розчин, напівпровідник.

**DOI:** 10.32434/0321-4095-2020-130-3-197-201

**Вступ**

Створення матеріалів із заданими властивостями та їх керована модифікація є одними з найважливіших завдань сучасного матеріалознавства. Особливий інтерес академічної і прикладної науки зосереджено на твердотільних функціональних матеріалах. До речовин, що є основою для отримання таких матеріалів, можна віднести складнооксидні сполуки молібдену і вольфраму, які завдяки можливості варіювання їх складу, фізико-хімічних, електрофізичних і оптичних характеристик знаходять застосування в сучасній техніці та електроніці [1,2]. Так, значне число робіт присвячено вивченню складних оксидів молібдену і вольфраму зі структурою, що споріднена до шееліту  $\text{CaWO}_4$  [2,3]. Похідні цього мінералу знайшли широке застосування, наприклад, тверді розчини

$(\text{Na}_{0,5x}\text{Bi}_{0,5x}\text{Ca}_{1-x})\text{MoO}_4$ , де  $x=0,1\text{-}0,6$  зарекомендували себе як діелектричні матеріали [4], складно-заміщені по катіону  $\text{Li}_3\text{Ba}_2\text{La}_3(\text{MoO}_4)_8\text{:Er}^{3+}$  та  $\text{NaPbLa}(\text{MoO}_4)_3\text{:Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  як унікальні антистоксові люмінофори [5,6]. Одним з найбільш перспективних напрямів застосування заміщених складнооксидних сполук на основі структурного типу шееліту є гетерогенний фотокаталітичний розклад води. Серед найбільш ефективних підходів до покращення каталітичних властивостей таких молібдатів є контрольована модифікація катіонної підґратки за принципами ізо- та гетеровалентного заміщення.

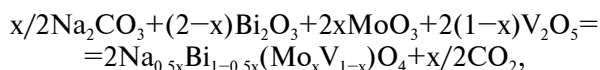
Поряд з широким дослідженням катіон-заміщених сполук зі структурою шееліту, аніонні заміщення все ще лишаються поза увагою. Так, лише для декількох представників цієї родини вивчено процеси заміщення в аніонній

позиції молібдену(VI) на вольфрам(VI) [7] або ванадій(V) [8,9].

Метою даної роботи є аналіз кристалохімічних особливостей одержання ізоморфних твердих розчинів у системі  $\text{Na}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{MoO}_4\text{--BiVO}_4$  та встановлення закономірностей зміни морфології одержаних порошків та їх ширини забороненої зони.

#### **Експериментальна частина**

Як вихідні реагенти використовувалися:  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  (х.ч.),  $\text{MoO}_3$  (х.ч.),  $\text{V}_2\text{O}_5$  (ч.д.а.) та  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (х.ч.) без попередньої очистки. Вихідні суміші готувалися із вказаних компонентів відповідно до наведеної схеми твердофазної взаємодії:



де  $x=0,1\text{--}0,9$ .

Одержану суміш у кожному випадку ретельно перетирали з додаванням краплі етилового спирту у агатовій ступці. На першому етапі проводилось попереднє нагрівання реагентів до 700 К за 1 год для забезпечення розкладу карбонату. На наступному етапі здійснювали поетапне спікання при температурі від 775 до 975 К з кроком 50 град, витримкою 8 год та ретельною перешихтовкою на кожній стадії. Процеси фазоутворення контролювали за допомогою ІЧ-спектроскопії та рентгенофазового аналізу.

Дифрактограми записували за допомогою автоматичного порошкового дифрактометра Shimadzu XRD 6000 у режимі відбиття від плоских зразків ( $\text{CuK}_\alpha$  випромінювання з  $\lambda=1,54178 \text{ \AA}$ ; метод  $2\theta$  безперервного сканування зі швидкістю  $1,2^\circ 2\theta$  на хвилину; діапазон кутів  $2\theta$  від  $5,0$  до  $65,0^\circ$ ; графітовий монохроматор перед детектором). ІЧ-спектри записано на приладі «Perkin Elmer Spectrum BX» у таблетках КВг для діапазону частот від 400 до  $4000 \text{ см}^{-1}$ . Електронні спектри записані на приладі Thermo Scientific Evolution 600, у діапазоні 190–600 нм з роздільною здатністю 0,2 нм. Скануюча електронна мікроскопія виконувалась на приладі JEOL JSM 6060 LV з напленням золота.

#### **Результати та обговорення**

Основною метою дослідження було вивчення умов одержання мікропорошків подвійних солей в межах псевдобінарного розрізу  $x\text{Na}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{MoO}_4\text{--}(1-x)\text{BiVO}_4$  із загальною формулою  $\text{Na}_{0,5x}\text{Bi}_{1-0,5x}(\text{Mo}_x\text{V}_{1-x})\text{O}_4$ , де  $x=0,1\text{--}0,9$ . З точки зору кристалохімічного аналізу тверді розчини є ізоморфними сумішами між  $\text{NaBi}(\text{MoO}_4)_2$  та  $\text{BiVO}_4$ , де обидві крайні точки становлять

тетрагональний каркас шееліту, тобто гетеровалентне заміщення розглядається в межах одного структурного типу і симетрії. Так, у структурі  $\text{NaBi}(\text{MoO}_4)_2$  шеелітовий каркас побудовано з тетраедрів  $\text{MoO}_4$  та тригональних антипризм  $(\text{Na/Bi})\text{O}_8$ , де натрій та бісмут статистично розпорядковані поміж однієї восьмикоординованої киснем позиції [10]. Тобто, можливості заміщення розглядаються з точки зору недеформованого структурного типу шееліту, що кристалізується в тетрагональній сингонії, просторовій групі  $I4_1/a$  і описується однією позицією для молібдену (або ванадію) в тетраедричному оточенні і однією позицією для катіона у восьмикоординованому кисневому оточенні. Поліедри  $(\text{Na/Bi})\text{O}_8$  та  $\text{MoO}_4$  у межах каркаса розміщуються у шаховому порядку, поєднуючись один з одним спільними вершинами, а  $(\text{Na/Bi})\text{O}_8$  ще й ребрами. Аналогічний тип упаковки спостерігається і у  $\text{BiVO}_4$  [9], для якого завдяки зміні температури або тиску можливе формування і інших типів каркаса з пониженням симетрії. З урахуванням спільних кристалографічних рис та ідентичного типу упаковки, логічно припустити формування твердих розчинів, де у аніонній гратці відбуватиметься заміщення атомів молібдену(VI) на ванадій (V), а компенсація заряду – за рахунок формування твердих розчинів у катіонній позиції  $(\text{Na/Bi})\text{O}_8$ , ймовірно, за статистичним механізмом розподілу катіонів. Таким чином, реалізується гетеровалентне заміщення по катіону та аніону в межах системи  $\text{NaBi}(\text{MoO}_4)_2\text{--BiVO}_4$  з формуванням ізоморфних твердих розчинів складу  $\text{Na}_{0,5x}\text{Bi}_{1-0,5x}(\text{Mo}_x\text{V}_{1-x})\text{O}_4$ .

На першому етапі дослідження синтезованих зразків проводився аналіз зміни морфології порошків при спіканні. На рис. 1, а-с наведено SEM зразків  $\text{Na}_{0,5x}\text{Bi}_{1-0,5x}(\text{Mo}_x\text{V}_{1-x})\text{O}_4$ , де  $x=0,1$  (а),  $0,5$  (б) та  $0,9$  (в) після спікання при 975 К. Тверді розчини формують стійкі мікрокристалічні порошки з розміром зерен  $0,5\text{--}5,0 \text{ мкм}$ , при цьому при зростанні вмісту молібдену у системі спостерігається збільшення середнього розміру зерна від 1 до 5 мкм. У кожному з розглянутих випадків поверхня зерен гладка, з чітко окресленими межами, високим ступенем кристалічності та агрегації.

У ІЧ-спектрах (рис. 1,г) одержаних твердих розчинів спостерігається широка смуга в діапазоні  $500\text{--}900 \text{ см}^{-1}$ . До найбільш інформативної ділянки у наданих спектрах належить діапазон від 400 до  $1500 \text{ см}^{-1}$ . З літератури відомо [9], що валентні коливання і молібдатної і ванадатної групи розташовуються приблизно в од-

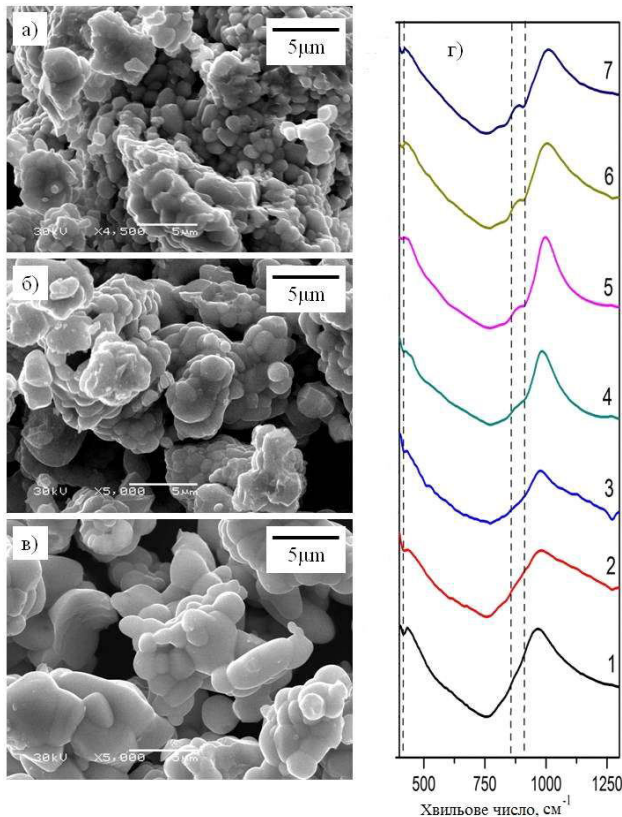


Рис. 1. СЕМ зображення твердих розчинів  $\text{Na}_{0,5x}\text{Bi}_{1-0,5x}(\text{Mo}_x\text{V}_{1-x})\text{O}_4$ , де  $x=0,1$  (а),  $0,5$  (б),  $0,9$  (в) та ІЧ спектри:  $x=0,1$  (крива 1);  $x=0,2$  (крива 2);  $x=0,3$  (крива 3);  $x=0,5$  (крива 4);  $x=0,7$  (крива 5);  $x=0,8$  (крива 6);  $x=0,9$  (крива 7)

ному інтервалі і у випадку тетраедричного оточення знаходяться у діапазоні від  $750\text{--}950\text{ cm}^{-1}$ . Для усіх досліджених сполук спостерігається широка смуга, що однозначно вказує на те, що і ванадатний і молібдатний тетраедр статистично розупорядковані по одній позиції. Однак, при зростанні вмісту молібдату відбувається поява плеча близько  $870\text{ cm}^{-1}$ , що демонструє вклад саме цієї групи у набір смуг валентних коливань. Деформаційні коливання є малоінтенсивними і спостерігаються для усіх твердих розчинів близько  $440\text{ cm}^{-1}$ .

За даними рентгенофазового аналізу, набір рефлексів, що було отримано в діапазоні  $10\text{--}70$  градусів  $2\theta$  є однаковими для всього ряду і свідчить про утворення ізоструктурних твердих розчинів (рис. 2,а). Так, характеристичним є дифракційний рефлекс при куті  $2\theta=19^\circ$ , індексований як (101). При пониженні симетрії шеелітового каркаса цей рефлекс розщеплюється на два: (101) та (110) [9]. Також характеристичним є рефлекс при  $2\theta=35^\circ$ , проіндексований як (200), який у випадку моноклінної деформації

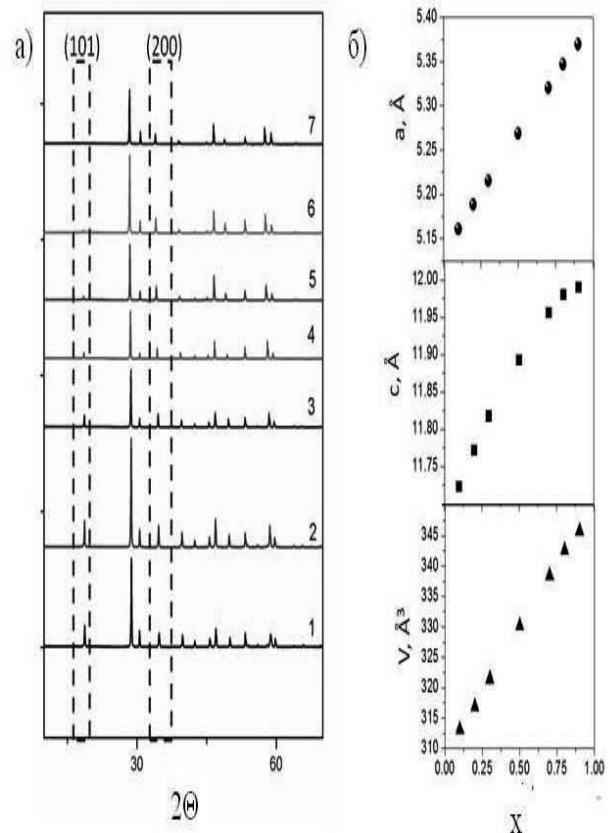


Рис. 2. а – Рентгенограмами твердих розчинів  $\text{Na}_{0,5x}\text{Bi}_{1-0,5x}(\text{Mo}_x\text{V}_{1-x})\text{O}_4$ , де  $x=0,1$  (крива 1),  $x=0,2$  (крива 2),  $x=0,3$  (крива 3),  $x=0,5$  (крива 4),  $x=0,7$  (крива 5),  $x=0,8$  (крива 6),  $x=0,9$  (крива 7); (б) – залежності параметрів комірки від ступеня заміщення

шееліту приводить до розщеплення на (202) та (022) [9]. Усі інші дифракційні рефлекси повністю співпадають як за положенням так і за інтенсивністю із таким для недеформованого тетрагонального шееліту. Параметри елементарної комірки одержаних твердих розчинів наведено на рис. 2,б, що ілюструє закон Vegarda для ідеального ізоморфізму.

Експериментальні спектри дифузного відбиття було використано для оцінювання ширини забороненої зони досліджуваних зразків (рис. 3). Для цього було використано загальноприйнятий метод, запропонований Тауцом для знаходження оптичної ширини забороненої зони напівпровідників [11]. Відповідно до цього методу, побудовано залежності  $(\alpha h\nu)^{1/\tau}=f(h\nu)$ , де  $\alpha$  – показник поглинання,  $\tau$  – константа, яка залежить від характеристик поглинального переходу та електронної будови кристалу,  $h\nu$  – енергія фотона, що поглинається. Величина, що пропорційна показнику поглинання, була знай-

дена зі спектрів дифузного відбивання згідно з перетворенням Кубелки-Мунка. У відповідності з основами зонної будови твердого тіла, кристали  $\text{BiVO}_4$  є прямозонними напівпровідником з дозволеними поглинальними переходами [9]. На рис. 3 наведено побудову Тауца залежності  $(\alpha h\nu)^{1/r} = f(h\nu)$  для твердих розчинів  $\text{Na}_{0,5x}\text{Bi}_{1-0,5x}(\text{Mo}_x\text{V}_{1-x})\text{O}_4$ , де  $x=0,1$  (крива 1),  $0,5$  (крива 2),  $0,9$  (крива 3). Штрихові лінії на рисунку є продовженнями прямолінійної ділянки кожної залежності до перетину з віссю енергій. Як видно з рис. 3, при збільшенні вмісту молібдену від  $0,1$  до  $0,5$  та далі до  $0,9$  ширина забороненої зони,  $E_g$ , зростає від  $2,28$  еВ до  $2,43$  еВ та до  $2,67$  еВ, відповідно. Одержані значення є проміжними між величинами заборонених зон кристалів  $\text{BiVO}_4$  ( $E_g=2,3$  еВ) та  $\text{NaBi}(\text{MoO}_4)_2$  ( $E_g=3,40$  еВ) [11].

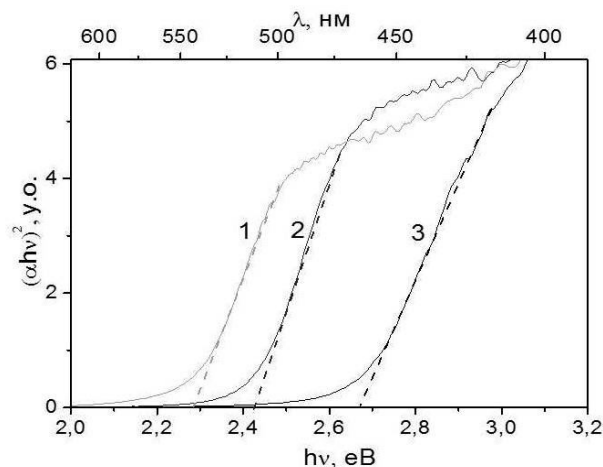


Рис. 3. Спектри дифузного відбиття у координатах Тауца для  $\text{Na}_{0,5x}\text{Bi}_{1-0,5x}(\text{Mo}_x\text{V}_{1-x})\text{O}_4$ , де  $x=0,1$  (крива 1),  $0,5$  (крива 2),  $0,9$  (крива 3)

### Висновки

Таким чином, тверді розчини  $\text{Na}_{0,5x}\text{Bi}_{1-0,5x}(\text{Mo}_x\text{V}_{1-x})\text{O}_4$ , де  $x=0,1-0,9$  є напівпровідниками з шириною забороненої зони в межах  $2,28-2,67$  еВ, що виявляють значний інтерес для процесів фотокаталітичного розкладу води. Так, найбільш відомий на сьогодні фотокаталізатор  $\text{BiVO}_4:\text{Mo}$  має  $E_g$  в інтервалі  $2,3-2,4$  еВ [9] і характеризується значною ймовірністю електрон-діркової рекомбінації, що знижує ефективність каталітичного розкладу води. У випадку гетеровалентного заміщення в межах  $\text{NaBi}(\text{MoO}_4)_2$  та  $\text{BiVO}_4$  спостерігається ідеальний ізоморфізм, що супроводжується зростанням об'єму елементарної комірки зі збільшенням

ступеня заміщення  $x$ , тобто, слід очікувати пропорційного збільшення об'єму координаційних поліедрів  $(\text{Na}/\text{Bi})\text{O}_8$ , а отже, і середньостатистичної відстані  $(\text{Na}/\text{Bi})-\text{O}$ . При цьому розподіл натрію та бісмуту в позиції впливає як на ступінь іонності зв'язків  $(\text{Na}/\text{Bi})-\text{O}$ , так і на кількість точкових дефектів, пов'язаних з ними. Такий висновок дозволяє припустити можливість більш складного заміщення в цих поліедрах на інші каталітично-активні катіони металічних елементів зі збереженням або деформуванням кристалічного каркаса шееліту, а отже контрольованого впливу на ефективність таких каталізаторів.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Oxide-ion* conduction via interstitials in scheelite-type  $\text{LaNbO}_4$ : a first-principles study / Toyoura K., Sakakibara Y., Yokoi T., Nakamura A., Matsunaga K. // *J. Mater. Chem. A*. – 2018. – Vol.6. – No. 25. – P.12004-12011.
2. *Synthesis* of scheelite nanoparticles by mechanically assisted solid-state reaction of wolframite and calcium carbonate / Polini R., Paci B., Generosi A., Marcheselli G. // *Miner. Eng.* – 2019. – Vol.138. – P.133-138.
3. *Baur F., Justel T.*  $\text{Eu}^{3+}$  activated molybdates—structure property relations // *Opt. Mater. X*. – 2019. – Vol.1. – Article No. 100015.
4. *Structure–property* relationships of novel microwave dielectric ceramics with low sintering temperatures:  $(\text{Na}_{0,5x}\text{Bi}_{0,5x}\text{Ca}_{1-x})\text{MoO}_4$  / Guo J., Zhou D., Li Y., Shao T., Qi Z. M., Jin B.B., Wang H. // *Dalton Trans.* – 2014. – Vol.43. – No. 31. – P.11888-11896.
5. *Kozhevnikova N.M., Batueva S.Yu.* Synthesis and luminescence properties of a  $\text{Li}_3\text{Ba}_2\text{La}_3(\text{MoO}_4)_8:\text{Er}^{3+}$  phosphor with a layered scheelite-like structure // *Inorg. Mater.* – 2019. – Vol.55. – No. 6. – P.1162-1166.
6. *Microwave* sol-gel synthesis, microstructural and spectroscopic properties of scheelite-type ternary molybdate upconversion phosphor  $\text{NaPbLa}(\text{MoO}_4)_3:\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  / Lim C.S., Aleksandrovsky A.S., Atuchin V.V., Molokeev M.S., Oreshonkov A.S. // *J. Alloys Compd.* – 2019. – Vol.826. – Article No. 152095.
7. *Characterization* and photoluminescence properties of  $\text{AgLn}(\text{MoO}_4)(\text{WO}_4)$ : novel silver based scheelite-type compounds / You C., Yue L., Colon C., Fernandez-Martinez F., Lin L., Gao M. // *J. Lumin.* – 2019. – Vol.210. – P.255-260.
8. *Luminescence* properties of the new complex La,  $\text{BiVO}_4$ : Mo, Eu compounds as materials for down-shifting of VUV–UV radiation / Nedilko S.G., Chukova O., Chornii V., Degoda V., Bychkov K., Terebilenko K., Slobodyanik M. // *Radiat. Meas.* – 2016. – Vol.90. – P.282-286.
9. *Structural* transformation of  $\text{Bi}_{1-x}/3\text{V}_{1-x}\text{Mo}_x\text{O}_4$  solid solutions for light-driven water oxidation / Terebilenko K.V.,

Bychkov K.L., Baumer V.N., Slobodyanik N.S., Pavliuk M.V., Thapper A., Tokmenko I.I., Nasieka I.M., Strelchuk V.V. // Dalton Trans. – 2016. – Vol.45. – No. 9. – P.3895-3904.

10. Highly sensitive sensor based on NaBi(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>/MWCNT composites / Zhu C., Du F., Fu P., Wang S., Lin Z. // Mater. Res. Express. – 2018. – Vol.5. – No. 12.– Article No. 125016.

11. Li M., Li J.C. Size effects on the band-gap of semiconductor compounds // Mater. Lett. – 2006. – Vol.60. – No. 20. – P.2526-2529.

Надійшла до редакції 09.10.2019

#### CRYSTAL-CHEMICAL ASPECTS OF ISOMORPHISM IN THE SYSTEM Na<sub>0.5</sub>Bi<sub>0.5</sub>MoO<sub>4</sub>–BiVO<sub>4</sub>

K.V. Terebilenko <sup>a, \*</sup>, O.V. Petrenko <sup>a</sup>, I.I. Tokmenko <sup>b</sup>, M.S. Slobodyanik <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

<sup>b</sup> Bogomolets National Medical University, Kyiv, Ukraine

\* e-mail: kterebilenko@gmail.com

For the binary system  $x\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{MoO}_4-(1-x)\text{BiVO}_4$ , an ideal isomorphism was established within  $x=0.1-0.9$  leading to the formation of solid solutions of the total composition  $\text{Na}_{0.5x}\text{Bi}_{1-0.5x}(\text{Mo}_x\text{V}_{1-x})\text{O}_4$ , which belongs to the structural type of scheelite and crystallizes in a tetragonal system, space group  $I41/a$ . The use of the solid-state approach allowed producing powdered samples of all the representatives of solid solutions with a grain size of 0.5 to 5.0 mm. An increase in  $x$  value leads to an increase in the grain size up to the average value of 5 mm according to the data of scanning electron microscopy. The results of IR spectroscopy and powder X-ray diffraction method revealed that molybdenum and vanadium occupy a single crystallographic position with a statistical distribution for  $x=0.1-0.9$ , while the symmetry of the framework does not change. The charge compensation is realized due to the proportional substitution of bismuth in the polyhedra with the mixed (Na/Bi)O<sub>8</sub> polyhedra. As the molybdenum content in the solid solutions increases, there is a proportional increase in the volume of the unit cell of the scheelite framework illustrating the Vegard rule for the ideal isomorphism. According to the data of diffuse reflection spectroscopy, it was shown that there is an increase in the band gap values from 2.28 to 2.67 eV for the semiconductors obtained when the value of substitution ( $x$ ) increases. This allows considering them as promising photocatalysts for water splitting reaction.

**Keywords:** scheelite; molybdenum; vanadium; bismuth; isomorphism; solid solution; semiconductor.

#### REFERENCES

1. Toyoura K., Sakakibara Y., Yokoi T., Nakamura A., Matsunaga K. Oxide-ion conduction via interstitials in scheelite-type LaNbO<sub>4</sub>: a first-principles study. *Journal of Materials Chemistry A*, 2018, vol. 6, pp. 12004-12011.

2. Polini R., Paci B., Generosi A., Marcheselli G. Synthesis of scheelite nanoparticles by mechanically assisted solid-state reaction of wolframite and calcium carbonate. *Minerals Engineering*, 2019, vol. 138, pp. 133-138.

3. Baur F., Justel T. Eu<sup>3+</sup> activated molybdates – structure property relations. *Optical Materials: X*, 2019, vol. 1, article no. 100015.

4. Guo J., Zhou D., Li Y., Shao T., Qi Z.M., Jin B.B., Wang H. Structure–property relationships of novel microwave dielectric ceramics with low sintering temperatures: (Na<sub>0.5x</sub>Bi<sub>0.5x</sub>Ca<sub>1-x</sub>)MoO<sub>4</sub>. *Dalton Transactions*, 2014, vol. 43, pp. 11888-11896.

5. Kozhevnikova N.M., Batueva S.Yu. Synthesis and luminescence properties of a Li<sub>3</sub>Ba<sub>2</sub>La<sub>3</sub>(MoO<sub>4</sub>)<sub>8</sub>:Er<sup>3+</sup> phosphor with a layered scheelite-like structure. *Inorganic Materials*, 2019, vol. 55, pp. 1162-1166.

6. Lim C.S., Aleksandrovsky A.S., Atuchin V.V., Molokeev M.S., Oreshonkov A.S. Microwave sol-gel synthesis, microstructural and spectroscopic properties of scheelite-type ternary molybdate upconversion phosphor NaPbLa(MoO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>:Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, vol. 826, article no. 152095.

7. You C., Yue L., Colon C., Fernandez-Martinez F., Lin L., Gao M. Characterization and photoluminescence properties of AgLn(MoO<sub>4</sub>)(WO<sub>4</sub>): novel silver based scheelite-type compounds. *Journal of Luminescence*, 2019, vol. 210, pp. 255-260.

8. Nedilko S.G., Chukova O., Chornii V., Degoda V., Bychkov K., Terebilenko K., Slobodyanik M. Luminescence properties of the new complex La<sub>3</sub>BiVO<sub>4</sub>: Mo, Eu compounds as materials for down-shifting of VUV–UV radiation. *Radiation Measurements*, 2016, vol. 90, pp. 282-286.

9. Terebilenko K.V., Bychkov K.L., Baumer V.N., Slobodyanik N.S., Pavliuk M.V., Thapper A., Tokmenko I.I., Nasieka I.M., Strelchuk V.V. Structural transformation of Bi<sub>1-x/3</sub>V<sub>1-x</sub>Mo<sub>x</sub>O<sub>4</sub> solid solutions for light-driven water oxidation. *Dalton Transactions*, 2016, vol. 45, pp. 3895-3904.

10. Zhu C., Du F., Fu P., Wang S., Lin Z. Highly sensitive sensor based on NaBi(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>/MWCNT composites. *Materials Research Express*, 2018, vol. 5, article no. 125016.

11. Li M., Li J.C. Size effects on the band-gap of semiconductor compounds. *Materials Letters*, 2006, vol. 60, pp. 2526-2529.