

покрытиях меньше, чем в исходном образце. При сравнении содержания кислорода в Mo/Al- и W/Al-структурах, полученных в одинаковых условиях, необходимо отметить, что количество кислорода больше в структурах Mo/Al. Установленное различие можно, по-видимому, связать с разной химической активностью Mo и W по отношению к кислороду.

Список использованных источников

1. Структура, термостойкость и микротвердость покрытий  $ZrO_2$ , полученных разными методами / С.Г. Валухов [и др.] // Неорганические материалы. – 2016. – Т. 52. – № 4. – С. 457–463.

2. Анализ ядерно-физическими методами состава покрытий, нанесенных на Al осаждением Zr и W при одновременном облучении одноименными ионами / В.В. Тульев [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 1998. – № 4. – С. 33–36.

3. Implantation of titanium, chromium, yttrium, molybdenum, silver, hafnium, tantalum, tungsten and platinum ions generated by a metal vapour vacuum ion source into 440C stainless steel / J. Sasaki [et. al.] // Surf. Coat. Technol. – 1992. – Vol. 51. – P. 166–175.

**Чобот А.Н.<sup>1</sup>, к.ф.-м.н., Латушко С.И.<sup>1</sup>, Желудкевич Д.В.<sup>1</sup>,  
Сиколенко В.В.<sup>2</sup>, к.ф.-м.н., Чобот Г.М.<sup>3</sup>, к.ф.-м.н., доцент,  
Латушко Т.В.<sup>4</sup>, Карпинский Д.В.<sup>1</sup>, к.ф.-м.н.**

<sup>1</sup>ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», Минск,  
Республика Беларусь

<sup>2</sup>Объединенный институт ядерных исследований, Дубна,  
Россия

<sup>3</sup>УО «Белорусский государственный аграрный технический  
университет», Минск, Республика Беларусь

<sup>4</sup>УО «Белорусский государственный медицинский  
университет», Минск, Республика Беларусь

**КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ТВЕРДЫХ  
РАСТВОРОВ ФЕРРИТА ВИСМУТА  
С ИОНАМИ-ЗАМЕСТИТЕЛЯМИ ЖЕЛЕЗА**

Одним из условий инновационного развития АПК является использование новых функциональных материалов с улучшенными

физическими свойствами. Благодаря уникальному сочетанию электрических и магнитных свойств материалы, относящиеся к классу мультиферроиков, являются предметом пристального внимания ученых-материаловедов. В этих материалах обнаружено одновременное сосуществование различных типов упорядочения. Как следствие этого, мультиферроики могут одновременно являться ферромагнетиками (либо антиферромагнетиками) и сегнетоэлектриками.

Наиболее известным мультиферроиком является феррит висмута. Этот материал обладает высокими температурами перехода в магнитоупорядоченное и сегнетоэлектрическое состояние [1-2]. Однако исходное соединение  $\text{BiFeO}_3$  имеет ряд существенных недостатков: этот состав характеризуется незначительной величиной остаточной намагниченности, обусловленной слабоферромагнитной структурой, а также обладает малой величиной магнитоэлектрического взаимодействия наряду с высокой проводимостью. Не менее известным мультиферроиком является соединение  $\text{BiMnO}_3$ . В отличие от феррита висмута, соединение  $\text{BiMnO}_3$  характеризуется низкотемпературным переходом в ферромагнитное состояние ( $T_c \sim 102$  К) и изменением кристаллической структуры при температуре  $T \sim 475$  К. При этом кристаллическая структура по-прежнему остается моноклинной. При температуре выше  $T \sim 770$  К соединение обладает неполярной орторомбической структурой. Магнитная структура  $\text{BiMnO}_3$  характеризуется положительными обменными взаимодействиями между ионами  $\text{Mn}^{3+}$ , характер которых существенно зависит от геометрии химических связей  $\text{Mn-O-Mn}$  [3]. Замещение ионов  $\text{Mn}^{3+}$  в соединении  $\text{BiMnO}_3$  на ионы  $\text{Fe}^{3+}$  приводит к увеличению температуры перехода в магнитоупорядоченное состояние. При этом усиливается антиферромагнитная компонента в обменных взаимодействиях между ионами  $\text{Mn}^{3+}$  и  $\text{Fe}^{3+}$ . Однако в настоящее время нет четкого понимания механизма изменений, происходящих в магнитной структуре этих составов при химическом замещении марганца ионами переходных металлов.

Соединения  $\text{BiMn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_3$  были синтезированы из оксидов  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и  $\text{Mn}_2\text{O}_3$ . Составы с  $x=0.6-0.8$  получены на аппарате высокого давления при 5 ГПа и 1300 К. Составы с  $x=0.1-0.5$  получены при перемешивании оксидов в планетарной мельнице с последующим прессованием в таблетки и синтезом при температуре 1000 К в течение 4 часов.

Согласно структурным данным, полученным для образцов  $\text{BiMn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_3$  с помощью нейтронного излучения, соединения с концентрацией ионов-заместителей  $x=0.1-0.3$  характеризуются однофазным структурным состоянием (моноклинная фаза, структура типа  $\text{BiMnO}_3$  (пространственная группа  $C2/c$ )) (рис. 1). Для  $\text{BiMn}_{0.80}\text{Fe}_{0.20}\text{O}_3$  характерна моноклинная элементарная ячейка ( $a = 9.5379(5)$ ;  $b = 5.6167(3)$ ;  $c = 9.7400(5)$  и  $\beta = 108.460(3)$ ).

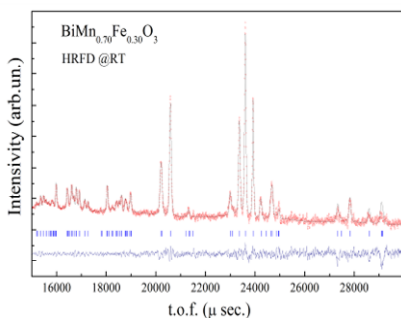


Рисунок 1 – Нейтронограмма соединения  $\text{BiMn}_{0.70}\text{Fe}_{0.30}\text{O}_3$

В структуре составов  $\text{BiMn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_3$  с  $x=0.4-0.5$  преобладает орторомбическая фаза с характерным антиполярным смещением ионов висмута и марганца (пространственная группа  $Pnma$ ), а также присутствует незначительная ( $\sim 10-15\%$ ) часть моноклинной фазы. Соединения  $\text{BiMn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_3$  с  $x=0.6-0.8$  характеризуются однофазной орторомбической структурой (пространственная группа  $Pnma$ ) с орторомбической элементарной ячейкой  $a = 5.6072(3)$ ;  $b = 15.6173(9)$ ;  $c = 11.2444(7)$  (рис. 2). Эта структура является метастабильной.

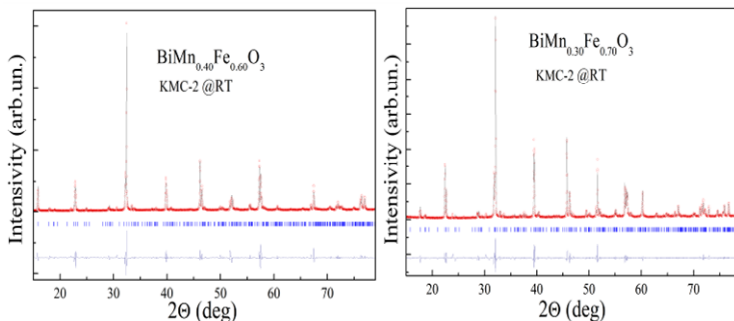


Рисунок 2 – Дифрактограммы соединений  $\text{BiMn}_{0.40}\text{Fe}_{0.60}\text{O}_3$  и  $\text{BiMn}_{0.30}\text{Fe}_{0.70}\text{O}_3$

Таким образом, нами установлено, что соединения  $\text{BiFeO}_3$  и  $\text{BiMnO}_3$  образуют твердые растворы во всем диапазоне составов. Новая орторомбическая ( $\sqrt{2}a_p \times 4a_p \times 2\sqrt{2}a_p$ ) фаза обнаружена между ромбоэдрическим  $\text{BiFeO}_3$  и моноклинным  $\text{BiMnO}_3$ .

Работа выполнена при поддержке БРФФИ (грант №Т20Р-121) и РФФИ (грант № 20-52-00023).

#### Список использованных источников

1. Слабый ферромагнетизм в мультиферроиках на основе  $\text{BiFeO}_3$  / И.О. Троянчук [и др.] // Письма в ЖЭТФ. – 2009. – Т. 89, №4. – С. 204–208.

2. Фазовые превращения в мультиферроиках  $\text{Bi}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$  / И.О. Троянчук [и др.] // ФТТ. – 2016. – Т. 58, №9. – С. 1719–1723.

3. Crystal and Magnetic Structure Transitions in  $\text{BiMnO}_{3+\delta}$  Ceramics Driven by Cation Vacancies and Temperature / D.V. Karpinsky [et al.] // Materials. – 2021. – V. 14. – P. 5805.

**Шевченко А.А., к.т.н., доцент**

**Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Республика Беларусь**

**СИНТЕЗ, СТРУКТУРА И СВОЙСТВА**

**СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКОВ  $\text{Sr Bi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$  ДЛЯ ОСАЖДЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ**

Тонкие сегнетоэлектрические пленки находят применение при создании устройств энергонезависимой памяти, конденсаторов, микроактюаторов, приемников инфракрасного излучения, оптических процессоров, волноводов и линий задержки, приборов на поверхностных акустических волнах и других акустооптических устройств. Однако практическое использование сегнетоэлектрических пленок в микроэлектронике сталкивается с серьезными трудностями из-за отсутствия совместимой технологии получения тонкопленочных сегнетоэлектрических материалов высокого качества с воспроизводимыми свойствами. И лишь в последнее десятилетие удалось добиться контролируемой совместимости тонких слоев сегнетоэлектриков с полупроводниковыми коммутационными мат-