

## Структура магнитоэлектрических нанокompозитов $(1-x)\text{Bi}_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{FeO}_3 - (x)\text{NiFe}_2\text{O}_4$

С. И. Латушко<sup>1\*</sup>, Н. В. Терешко<sup>1</sup>, М. В. Бушинский<sup>1</sup>, Т. В. Латушко<sup>2</sup>, Д. В. Карпинский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению»,  
ул. П. Бровки, 19, 220072 г. Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный медицинский университет,  
пр. Дзержинского, 83-15, 220083 г. Минск, Беларусь

\* e-mail: [latushkasi@physics.by](mailto:latushkasi@physics.by)

### Аннотация

Получены системы магнитоэлектрических нанокompозитов  $(1-x)\text{Bi}_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{FeO}_3 - (x)\text{NiFe}_2\text{O}_4$  с  $x = 0, 0.1, 0.2$ , изучена их кристаллическая структура методом дифракционного рентгеновского анализа. Результаты указывают на то, что при увеличении объемной доли феррита никеля происходит стабилизация орторомбической фазы с неполярным типом дипольного упорядочения, структура описывается пространственной группой  $Rnma$ , при этом происходит уменьшение степени ромбоэдрических искажений элементарной ячейки перовскита.

**Ключевые слова:** магнитоэлектрические композиты, сегнетоэлектрики, магнитные материалы, мультиферроики.

### Введение

Одной из актуальных задач современного материаловедения является разработка и получение магнитоэлектрических материалов в виде однофазных и композитных материалов, так как такие материалы востребованы при производстве различных электротехнических устройств – актуаторов, датчиков внешних воздействий (механическое напряжение, электрическое и магнитное поле) и др.

Известно, что магнитоэлектрическое взаимодействие наблюдается в так называемых мультиферроиках – материалах, обладающих несколькими типами «ферро» упорядочения, а именно ферромагнетизм, сегнетоэлектричество, ферроэластичность. Примерами таких материалов могут служить однофазные мультиферроики -  $\text{BiFeO}_3$ ,  $\text{RMnO}_3$  [1, 2], где R – редкоземельный элемент, однако такие материалы характеризуются малой величиной магнитоэлектрического взаимодействия; при этом магнитоэлектрический эффект быстро ослабевает при повышении температуры. Величина магнитоэлектрического сигнала присущего однофазным материалам может быть увеличена путем синтеза композитов, в качестве компонент которых используются эффективные электро- и магнитострикционными материалы.

Анализ полученных данных о композитных магнитоэлектриках указывает на перспективность поиска новых материалов со структурой 0-3 (магнитные включения в сегнетоэлектрической матрице), что обусловлено ограничениями в применении слоистых магнитоэлектриков (структура 2-2) для ряда приложений, несмотря на максимальную величину магнитоэлектрического взаимодействия в последних.

### **Экспериментальная часть**

Синтез поликристаллических образцов  $(1-x)\text{Bi}_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{FeO}_3 - (x)\text{NiFe}_2\text{O}_4$  с  $x = 0, 0.1, 0.2$ , проводился методом двухступенчатого твердофазного синтеза. В качестве исходных реагентов использовались простые оксиды  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Sm}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{NiO}$ . Смесь оксидов, взятых в стехиометрическом соотношении, смешивалась в течение 30 минут в планетарной мельнице RETSCH. Температура синтеза  $900^\circ\text{C}$ , после синтеза образцы закаливались при комнатной температуре.

Содержание кислорода в составах определялось методом термогравиметрического анализа путем определения потери массы при восстановлении до простых оксидов. В результате исследования было установлено, что содержание кислорода в полученных образцах близко к стехиометрическому составу и соответствует заявленным химическим формулам.

Рентгеноструктурные данные были получены на дифрактометрах ДРОН-3 (ДРОН-3 М) и Адани PowDix 600 с использованием  $\text{Cu-K}\alpha$  излучения при комнатной температуре, для отсека  $\text{K}\beta$  компоненты излучения использовался графитовый монохроматор. Шаг сканирования составлял  $0.02-0.03$  градуса, время экспозиции – 5-6 секунд. Фиксация данных производилась автоматически. Исследования кристаллической структуры проводились методом полнопрофильного анализа Ритвельда рентгеноструктурных данных.

### **Результаты и обсуждение**

Оценка фазовой чистоты композитов на основании данных рентгеноструктурной дифракции подтвердило отсутствие примесных фаз с точностью до стандартной погрешности метода ( $\sim 3\%$ ). Отсутствие примесных фаз подтверждено для всех исследуемых составов. Анализ рентгенограмм составов систем  $(1-x)\text{Bi}_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{FeO}_3 - (x)\text{NiFe}_2\text{O}_4$  указывает на формирование композитов согласно предложенным химическим формулам.

Дифракционные данные находятся в соответствии с моделью формирования композита, при которой кристаллиты составов обладают неоднородным распределением фаз композита по типу ядро-оболочка. При таком пространственном распределении компонент композита внутренняя часть кристаллитов характеризуется фазой с преобладанием феррита висмута со структурой перовскита; внешняя часть кристаллитов характеризуется формированием структуры типа шпинели с преобладанием ионов железа и никеля.

Анализ рентгенограмм указывает на то, что при увеличении концентрации магнитострикционной компоненты композитов (фазы со структурой шпинели) в фазе перовскита также происходят структурные изменения, характерные для твердых растворов  $\text{Bi}_{1-x}\text{Sm}_x\text{FeO}_3$ . В системе композитов  $(1-x)\text{Bi}_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{FeO}_3 - (x)\text{NiFe}_2\text{O}_4$  (рисунок 1) при увеличении объемной доли феррита никеля в компоненте  $\text{Bi}_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{FeO}_3$  происходит стабилизация орторомбической фазы, с неполярным типом дипольного упорядочения, структура компоненты описывается пространственной группой  $R\bar{3}m$ , при этом происходит уменьшение степени ромбоэдрических искажений элементарной ячейки перовскита. Дифракционные данные свидетельствуют о постепенном увеличении содержания орторомбической структуры в фазе перовскита, при этом объем элементарной ячейки фазы со структурой перовскита уменьшается при увеличении концентрации редкоземельных ионов.

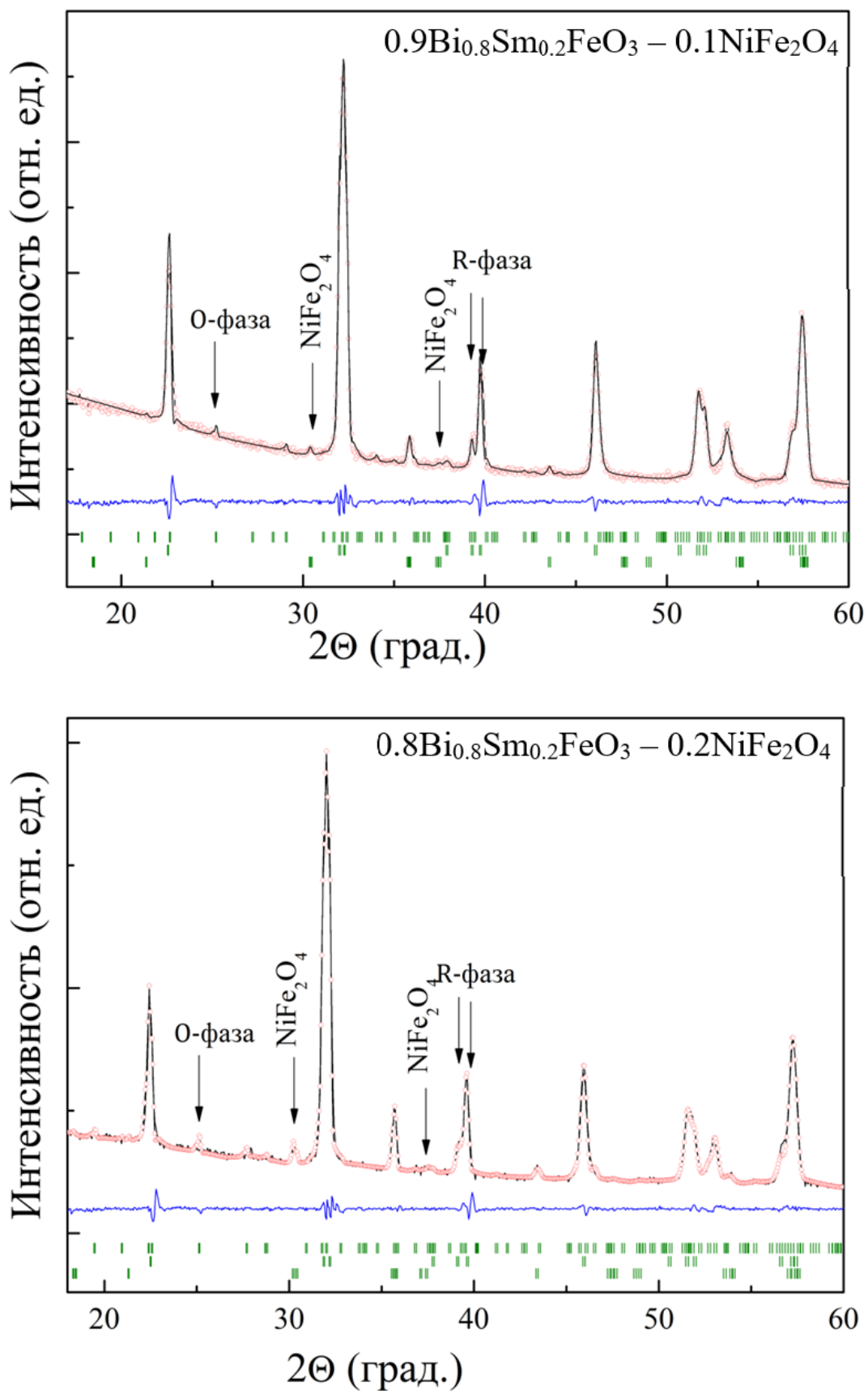


Рисунок 1. Уточненные спектры рентгеновской дифракции составов  $(1-x)\text{Bi}_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{FeO}_3 - (x)\text{NiFe}_2\text{O}_4$  ( $x = 0.1$  - верхний рисунок,  $x = 0.2$  - нижний). На спектрах можно выделить рефлексы, характерные для фазы перовскита с различным типом искажения элементарной ячейки, а также фазы со структурой шпинели

Рентгеновские дифрактограммы, полученные для композитов  $(1-x)\text{Bi}_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{FeO}_3 - (x)\text{NiFe}_2\text{O}_4$  предполагают формирование двух отдельных структурных фаз. При увеличении доли компоненты со структурой шпинели происходит изменение структурных искажений фазы перовскита. В частности усиливаются искажения, характерные для неполярного дипольного смещения ионов в элементарной ячейке, таким образом, в перовскитной фазе смещается баланс сосуществующих фаз в сторону неполярной орторомбической фазы, описываемой пространственной группой  $Pnma$ , при этом происходит уменьшение степени ромбоэдрических искажений элементарной ячейки перовскита.

### **Заключение**

Установлено, что в системе композитов  $(1-x)\text{Bi}_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{FeO}_3 - (x)\text{NiFe}_2\text{O}_4$  при увеличении объемной доли феррита никеля происходит стабилизация орторомбической фазы с неполярным типом дипольного упорядочения, структура описывается пространственной группой  $Pnma$ , при этом происходит уменьшение степени ромбоэдрических искажений элементарной ячейки перовскита.

### **Благодарность (финансирование)**

Работа поддержана Белорусским Республиканским Фондом Фундаментальных Исследований (грант № Ф24В-004).

### **Список использованных источников:**

- [1] D.V. Karpinsky [и др.] *Materials* 14(19) (2021) 5805.
- [2] M.V. Silibin [и др.] *Mod. Electron. Mater.* 9(2) (2023) 39-44.

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ  
«НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЦЕНТР НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ  
НАУК БЕЛАРУСИ ПО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЮ»  
(Институт Физики Твердого Тела и Полупроводников)



# **АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА**

СБОРНИК ДОКЛАДОВ  
XI Международной научной конференции

19 – 23 мая 2025 г.

ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению»  
Минск • 2025