

УДК 539.23; 537.311.3; 537.622

DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2024_1_58_57

EDN: QHXPQQ

СТЕПЕНЬ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ПОЛИТЕРМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА СТРОНЦИЙ-ЗАМЕЩЕННОГО ФЕРРОМОЛИБДАТА

М.В. Ярмолич¹, Н.А. Каланда¹, А.В. Петров¹, С.К. Лазарук², А.В. Семченко³,
Д. Сангаа⁴, С. Мунхтэцэг⁵

¹НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, Минск

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск

³Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

⁴Институт физики и технологии МАН, Улан-Батор

⁵Монгольский национальный университет, Улан-Батор

DEGREE OF PHASE TRANSFORMATIONS UNDER CONDITIONS OF POLYTHERMAL SYNTHESIS OF STRONTIUM-SUBSTITUTED FERROMOLYBDATE

M.V. Yarmolich¹, N.A. Kalanda¹, A.V. Petrov¹, S.K. Lazarouk², A.V. Semchenko³,
D. Sangaa⁴, S. Munkhtsetseg⁵

¹Scientific-Practical Materials Research Centre of the NAS of Belarus, Minsk

²Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk

³Francisk Skorina Gomel State University

⁴Institute of Physics and Technology of MAS, Ulanbaatar

⁵National University of Mongolia, Ulanbaatar

Аннотация. Изучена последовательность фазовых превращений при кристаллизации $\text{Sr}_{1.5}\text{La}_{0.5}\text{FeMoO}_{6-\delta}$ методом твердофазных реакций. Установлено, что для эффективного минимизирования влияния промежуточных продуктов реакции целесообразно применять прекурсоры и комбинированные режимы нагрева. В результате удалось получить однофазный порошок $\text{Sr}_{1.5}\text{La}_{0.5}\text{FeMoO}_{6-\delta}$ с температурой Кюри 450 К и с величиной намагниченности $40,9 \text{ A}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$ при $T = 77 \text{ K}$ в магнитном поле $0,86 \text{ Tл}$.

Ключевые слова: твердый раствор ферромолибдата лантана-стронция, термогравиметрический анализ, рентгенофазовый анализ, скорость кристаллизации, последовательность и степень фазовых превращений, намагниченность.

Для цитирования: Степень фазовых превращений в условиях политермического синтеза стронций-замещенного ферромолибдата / М.В. Ярмолич, Н.А. Каланда, А.В. Петров, С.К. Лазарук, А.В. Семченко, Д. Сангаа, С. Мунхтэцэг // Проблемы физики, математики и техники. – 2024. – № 1 (58). – С. 57–62. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2024_1_58_57. – EDN: QHXPQQ

Abstract. The sequence of phase transformations during the crystallization of $\text{Sr}_{1.5}\text{La}_{0.5}\text{FeMoO}_{6-\delta}$ was investigated by the solid-phase reactions method. It has been established that in order to effectively minimize the influence of intermediate reaction products, it is advisable to use precursors and combined heating modes. As a result, it was possible to obtain the single-phase $\text{Sr}_{1.5}\text{La}_{0.5}\text{FeMoO}_{6-\delta}$ powder with the Curie temperature of 450 K and a magnetization value of $40.9 \text{ A}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$ at $T = 77 \text{ K}$ in the magnetic field of 0.86 T .

Keywords: lanthanum-strontium ferromolybdate solid solution, thermogravimetric analysis, X-ray phase analysis, crystallization rate, sequence and degree of phase transformations, magnetization.

For citation: Degree of phase transformations under conditions of polythermal synthesis of strontium-substituted ferromolybdate / M.V. Yarmolich, N.A. Kalanda, A.V. Petrov, S.K. Lazarouk, A.V. Semchenko, D. Sangaa, S. Munkhtsetseg // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2024. – № 1 (58). – P. 57–62. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2024_1_58_57 (in Russian). – EDN: QHXPQQ

Введение

Большой интерес специалистов в области спинтроники вызывают твердые растворы $\text{Sr}_{2-x}\text{La}_x\text{FeMoO}_{6-\delta}$ с упорядоченной структурой двойного перовскита. Эти материалы характеризуются высокой химической стабильностью в восстановительной атмосфере, имеют высокие

значения температуры Кюри (420–470 К), выраженную спиновую поляризацию электронов проводимости (приближающуюся к 100%) и низкими значениями управляющих магнитных полей ($B < 0,5 \text{ Tл}$) [1]–[4]. Интерес к таким материалам обусловлен их уникальными и важными для практических применений магнитными и

магнитотранспортными свойствами, которые, однако, могут различаться в зависимости от способов их получения [4]–[8].

Важным условием для применения определенного магнитного материала в устройствах микроэлектроники является низкое удельное сопротивление и высокое значение температуры Кюри. В случае твердого раствора $\text{Sr}_{2-x}\text{La}_x\text{FeMoO}_{6-\delta}$ обнаружено, что увеличение содержания катионов лантана La^{3+} , который заменяет двухвалентный Sr^{2+} , приводит к увеличению концентрации электронов проводимости на уровне Ферми, и, согласно модели Рудермана – Киттеля – Касуя – Иосиды [9]–[13]. Это обуславливает рост обменных взаимодействий, и, соответственно, увеличение T_C [9], [10]. Обнаружено, что наименьшим удельным сопротивлением обладает $\text{Sr}_{1,5}\text{La}_{0,5}\text{FeMoO}_{6-\delta}$ [11]. Следует отметить, что дополнительное увеличение содержания La в составе материала приводит к ухудшению его гальваномагнитных свойств. Это объясняется наличием метастабильности магнитного состояния, вызванной одновременным сосуществованием ферромагнитных и антиферромагнитных взаимодействий [14], [15], что влияет на такие характеристики, как удельное сопротивление, намагниченность насыщения, температура Кюри и другие [9]–[13].

Важной проблемой в области спиновой электроники остается совершенствование технологии получения качественных образцов двойных перовскитов с воспроизводимыми магнитными и гальваномагнитными свойствами. Большое влияние на свойства двойных перовскитов оказывают антиструктурные (катион Fe на месте Mo и наоборот) и другие точечные дефекты (кислородные вакансии и их ассоциаты, межузельные дефекты, вакансии и т. д.) [16]–[19]. При образовании точечных дефектов в двойных перовскитах катионы железа могут находиться в различных спиновых состояниях: низкоспиновом $t_{2g}^6 e_g^0$, промежуточном $t_{2g}^5 e_g^1$ и высокоспиновом $t_{2g}^4 e_g^2$ [20]–[22]. Причем, при определенных термодинамических условиях может быть реализован случай, при котором имеется смесь высокого, промежуточного и низкого спинового состояний. Так, согласно данным рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, в $\text{Sr}_{2-x}\text{La}_x\text{FeMoO}_{6-\delta}$ установлено совместное сосуществование как цепочечных фрагментов 30% ($\text{Fe}^{3+} - \text{Mo}^{5+}$), так и 70% ($\text{Fe}^{2+} - \text{Mo}^{6+}$) [23]–[25]. Из этого следует, что важнейшими для применения материала в промышленности свойствами можно управлять путем контроля концентрации точечных дефектов.

При анализе накопленных данных, полученных рядом авторов, установлена многостадийность процесса кристаллизации $\text{Sr}_{2-x}\text{La}_x\text{FeMoO}_{6-\delta}$, что обусловлено сложностью фазовых превращений, низкой кинетикой фазообразования и слабой подвижностью катионов Fe^{3+} и Mo^{5+}

[26]–[30]. В публикациях есть сведения о получении двойных перовскитов механохимическим методом с последующим использованием высокотемпературного синтеза в восстановительной газовой среде [26]–[30]. В то же время в выполненных исследованиях практически отсутствуют строгие корреляции, связывающие функциональные характеристики материалов с их условиями получения. В этом случае, для формирования однофазного порошка $\text{Sr}_{1,5}\text{La}_{0,5}\text{FeMoO}_{6-\delta}$ с воспроизводимыми физико-химическими свойствами, необходим контроль над процессами дефектообразования. Это требует анализа фазовых превращений, происходящих в шихте, и изучения кинетики степени превращения двойного перовскита в процессе его кристаллизации. В связи с этим, особую значимость приобретают исследования, направленные на изучение высокотемпературных фазовых превращений и определение состава промежуточных кристаллических фаз при синтезе $\text{Sr}_{1,5}\text{La}_{0,5}\text{FeMoO}_{6-\delta}$. В настоящей статье будет установлена корреляционная зависимость между скоростью фазовых превращений и степени фазового превращения ферромолибдата лантана-стронция, что позволит осуществить направленное изменение фазового состава синтезируемой керамики с воспроизводимыми физико-химическими свойствами.

1 Синтез, материалы и методы исследования

Для изучения последовательности фазовых превращений в твердых растворах $\text{Sr}_{1,5}\text{La}_{0,5}\text{FeMoO}_{6-\delta}$ из прекурсоров SrMoO_4 , $\text{Sr}_{0,5}\text{La}_{0,5}\text{FeO}_3$ использовались реактивы La_2O_3 , Fe_2O_3 и MoO_3 , а также карбонат стронция SrCO_3 марки «ОСЧ». Помол и перемешивание стехиометрической смеси исходных реагентов проводилось в планетарной шаровой мельнице типа «PM 100» производства фирмы Retsch GmbH (Германия) в жидкой среде (спирт) в течение 3 часов. Полученные смеси сушились при температуре 350 К и прессовались в таблетки. Отжиги смеси проводились в политермическом режиме при температурах 300–1370 К в потоке 5% H_2 / Ar с последующей закалкой при комнатной температуре.

Фазовый состав продуктов твердофазного синтеза определялся на дифрактометре PANalytical Empyrean в $\text{CuK}\alpha$ -излучении с использованием базы данных ICSD-PDF2 (Release 2000). Дифрактограммы снимались при комнатной температуре со скоростью 60 °/ч в диапазоне углов $2\theta = 10 - 90^\circ$. Аргон-водородная атмосфера создавалась постоянным потоком аргон-водородной смеси через высокотемпературную камеру AntonPaar НТК 1200N. Эксперименты выполнялись в диапазоне температур 290–1270 К со скоростью нагрева 10 град/мин. При этом каждая точка измерялась последовательно по 4 раза при достижении заданной температуры (время экспозиции

2,5 минуты). Количественно-фазовый состав продуктов твердофазного синтеза и степень сверхструктурного упорядочения определялись на основании данных рентгеновской дифракции (РФА) с использованием программного обеспечения POWDERCELL [31] методом Ритвельда.

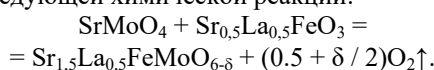
Термическое поведение образцов исследовалось методом термогравиметрического анализа (ТГА) на дифференциальном сканирующем калориметре Setaram Labsys TG-DSC16 в потоке аргона при скорости нагрева 1,4 град / мин.

Температура Кюри определялась путем анализа температурных зависимостей намагниченности образца $Sr_{1,5}La_{0,5}FeMoO_{6-\delta}$ пондеромоторным методом в диапазоне температур 77–800 К в приложенном магнитном поле 0,86 Тл, с использованием универсальной установки PPMS производства Cryogenic Ltd.

2 Результаты исследования и их обсуждение

На основании изучения последовательности фазовых превращений при кристаллизации $Sr_{1,5}La_{0,5}FeMoO_{6-\delta}$ установлено, что синтез ферромолибдата лантан-стронция в смеси простых оксидов протекает через ряд последовательно-параллельных стадий (рисунок 2.1). На основании данных рентгеновской дифракции и ТГА обнаружено, что на начальном этапе взаимодействия образующийся твердый раствор ферромолибдата лантана-стронция обогащен железом и его состав в ходе реакции меняется в сторону увеличения содержания молибдена. В частности, при рассмотрении динамики фазовых превращений обнаружено, что основными сопутствующими фазами при кристаллизации твердого раствора двойного перовскита $Sr_{1,5}La_{0,5}FeMoO_{6-\delta}$ являются $SrMoO_4$, $Sr_{0,5}La_{0,5}FeO_3$ (рисунок 2.1).

Данное обстоятельство указывает, что эти соединения являются структурообразующими для твердого раствора ферромолибдата лантан-стронция. Становится очевидным, что для повышения скорости протекания физико-химических процессов необходимо уменьшение диффузионного пути движения исходных реагентов в реакционную зону за счет устранения промежуточных продуктов реакций при кристаллизации. Поэтому для ускорения процесса синтеза в качестве исходных реагентов использовались сложные оксиды $SrMoO_4$ и $Sr_{0,5}La_{0,5}FeO_3$. В результате использования прекурсоров удалось синтезировать однофазный ферромолибдат лантан-стронция без сверхструктурного упорядочения (рисунок 2.2) при $T = 1370$ К в потоке газовой смеси 5% H_2 / Ar в течение 40 часов, согласно следующей химической реакции:



При этом величина намагниченности (M) составляет $21,8 \text{ A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ при $T = 77$ К в магнитном поле 0,86 Тл, а температура Кюри – 443 К (вставка на рисунке 2.2).

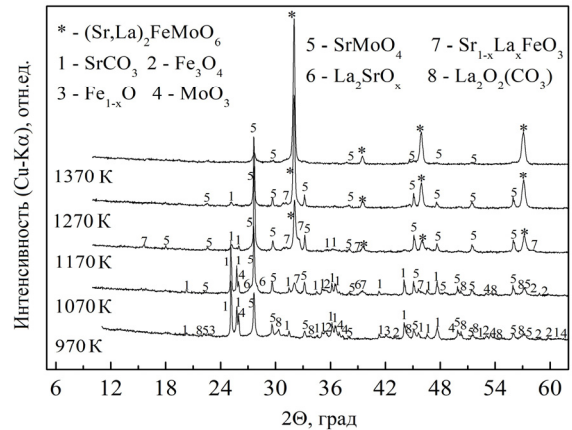


Рисунок 2.1 – Рентгенограммы образцов, синтезированных в непрерывном потоке 5% H_2 / Ar из стехиометрической смеси исходных реагентов $MoO_3 + 0,25La_2O_3 + 0,5Fe_2O_3 + 1,5SrCO_3$ при скорости нагрева 1,5 град / мин в диапазоне температур 300–1240 К с последующей их закалкой при комнатной температуре

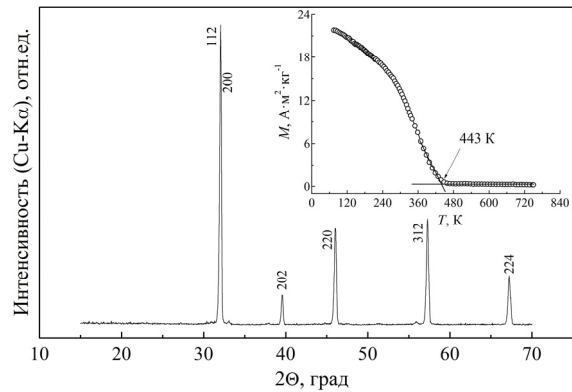


Рисунок 2.2 – Рентгеновская дифрактограмма однофазного образца $Sr_{1,5}La_{0,5}FeMoO_{6-\delta}$: синтезированного из прекурсоров $Sr_{0,5}La_{0,5}FeO_3$ и $SrMoO_4$ при $T = 1370$ К в потоке 5% H_2 / Ar в течение 40 часов. На вставке представлена температурная зависимость намагниченности полученного таким образом однофазного образца $Sr_{1,5}La_{0,5}FeMoO_{6-\delta}$

Для оптимизации режимов получения однофазного образца $Sr_{1,5}La_{0,5}FeMoO_{6-\delta}$ со сверхструктурным упорядочением катионов Fe / Mo из прекурсоров были построены и проанализированы температурные зависимости степени фазовых превращений в процессе кристаллизации двойного перовскита (рисунки 2.3, 2.4).

Обнаружено, что с увеличением температуры нагрева выше 770 К наблюдается уменьшение амплитудного значения α_{\max} для обоих соединений $SrMoO_4$ и $Sr_{0,5}La_{0,5}FeO_3$. Наличие более значительных кинетических трудностей при растворении $SrMoO_4$ подтверждают данные по температурам, при которых амплитудные значения производной степени превращения $(d\alpha / dT)_{\min}$,

указывающие на максимальную скорость растворения, на 100 К выше, чем для соединения $\text{Sr}_{0,5}\text{La}_{0,5}\text{FeO}_3$. При рассмотрении скоростей разложения оксидов замечено, что наибольшие значения минимума $(d\alpha/dT)_{\min} = -0,23$ наблюдается для $\text{Sr}_{0,5}\text{La}_{0,5}\text{FeO}_3$ при $T = 1049$ К, а для SrMoO_4 – $(d\alpha/dT)_{\min} = 0,19$ при $T = 1150$ К (рисунок 2.3). Это указывает на более высокую скорость протекания химических процессов с растворением $\text{Sr}_{0,5}\text{La}_{0,5}\text{FeO}_3$ по сравнению с ситуацией с молибдатом стронция (рисунок 2.3). На основании выше полученных данных следует, что для уменьшения процессов фазообразования и увеличения скорости разложения промежуточных продуктов реакции SrMoO_4 и $\text{Sr}_{0,5}\text{La}_{0,5}\text{FeO}_3$ при кристаллизации твердого раствора $\text{Sr}_{1,5}\text{La}_{0,5}\text{FeMoO}_{6-\delta}$ следует учитывать динамику фазовых превращений и применять комбинированные условия нагрева. Так, в низкотемпературной области, где осуществляется образование и рост двойных оксидов, скорость подъема температуры следует использовать максимальную, а в высокотемпературной, где наблюдается растворение образовавшихся побочных соединений, – низкую.

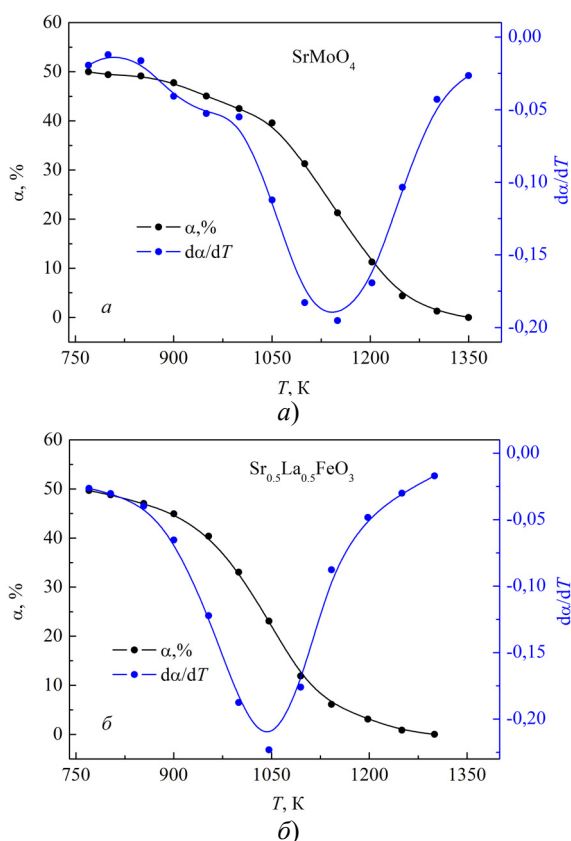


Рисунок 2.3 – Температурные зависимости степени превращения и их производные для соединений SrMoO_4 (а) и $\text{Sr}_{0,5}\text{La}_{0,5}\text{FeO}_3$ (б)

Согласно данным анализа $\alpha = f(T)$ установлено, что при увеличении температуры степень превращения $\text{Sr}_{1,5}\text{La}_{0,5}\text{FeMoO}_{6-\delta}$ увеличивается и при $T = 1370$ К достигает максимальных значений

$\alpha = 100\%$ (рисунок 2.4). При этом в интервале температур $T \approx 1060$ – 1140 К наблюдается замедление скорости роста двойного перовскита с наличием $\min |(d\alpha/dT)|$ при 1100 К, обусловленное, скорее всего, уменьшением коэффициентов химической диффузии реагентов в реакционную зону (рисунок 2.4). Обнаруженное поэтапное изменение скорости роста $\text{Sr}_{1,5}\text{La}_{0,5}\text{FeMoO}_{6-\delta}$ с присутствием двух максимумов ($\max |d\alpha/dT|$) скорости изменения степени превращения функции вида $d\alpha/dt = f(T)$ при $T \approx 1040$ К и 1160 К совпадает с температурами максимального растворения $\text{Sr}_{0,5}\text{La}_{0,5}\text{FeO}_3$ и SrMoO_4 , установленными выше.

В этом случае выявленный факт более быстрого вступления в реакцию $\text{Sr}_{0,5}\text{La}_{0,5}\text{FeO}_3$ в области температур существования первого максимума $\max |d\alpha/dT|$ скорости роста $\text{Sr}_{1,5}\text{La}_{0,5}\text{FeMoO}_{6-\delta}$, скорее всего, связан с реализацией такого механизма кристаллизации, при котором минимизируются кинетические трудности за счет интенсивного растворения $\text{Sr}_{0,5}\text{La}_{0,5}\text{FeO}_3$, что приводит к увеличению скорости роста двойного перовскита. Такой же химический процесс при кристаллизации магнетика реализуется в области температур существования второго максимума $\max |d\alpha/dT|$ скорости роста $\text{Sr}_{1,5}\text{La}_{0,5}\text{FeMoO}_{6-\delta}$, только теперь за счет интенсивного растворения SrMoO_4 . При этом скорость всего превращения определяется скоростью взаимодействия реагентов на границе раздела с зёрнами $\text{Sr}_{1,5}\text{La}_{0,5}\text{FeMoO}_{6-\delta}$.

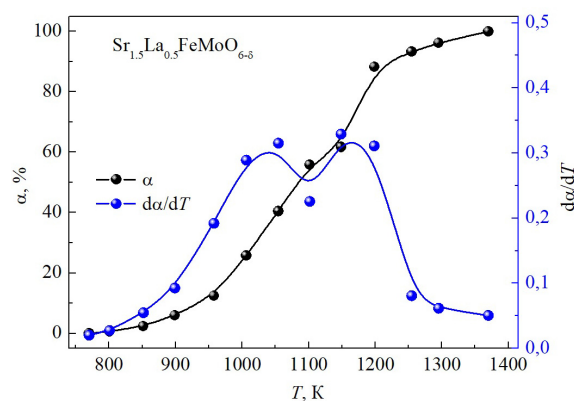


Рисунок 2.4 – Температурные зависимости степени превращения и ее производной для соединения $\text{Sr}_{1,5}\text{La}_{0,5}\text{FeMoO}_{6-\delta}$

На основании выше полученных данных для получения однофазного твердого раствора были оптимизированы комбинированные режимы нагрева:

– на первом этапе производился предварительный синтез при $T = 1050$ К в течение 20 часов. Данная температура была выбрана в связи с тем, что при ее значении наблюдается $\min |(d\alpha/dT)|$ для соединения $\text{Sr}_{0,5}\text{La}_{0,5}\text{FeO}_3$, а также $\max |(d\alpha/dT)|$ для твердого раствора $\text{Sr}_{1,5}\text{La}_{0,5}\text{FeMoO}_{6-\delta}$;

– на втором этапе, для увеличения реакционной способности смеси и диффузионной подвижности реагентов, измельчался образовавшийся слой продукта реакции, гомогенизировался и высокая дисперсность шихты достигалась путем тонкого вибропомола в спирту в течение 2 часов;

– на третьем этапе, с целью максимально быстрого разложения промежуточных фаз SrMoO_4 и $\text{Sr}_{0,5}\text{La}_{0,5}\text{FeO}_3$ и достижения значений степени превращения $\alpha = 100\%$ для $\text{Sr}_{1,5}\text{La}_{0,5}\text{FeMoO}_{6-\delta}$, синтез осуществлялся при $T = 1050$ К в течение 5 часов, с последующим нагревом до $T = 1150$ К, так как в таких условиях были достигнуты максимальные скорости изменения степени превращения двойного перовскита.

В результате использования комбинированных режимов синтеза удалось получить однофазное соединение $\text{Sr}_{1,5}\text{La}_{0,5}\text{FeMoO}_{6-\delta}$ с наличием сверхструктурного упорядочения катионов железа и молибдена, на что указывают рентгеновские рефлексы (101) и (103) (рисунок 2.5).

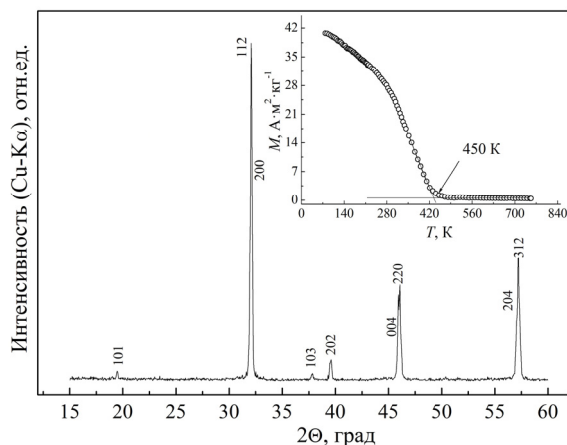


Рисунок 2.5 – Рентгеновская дифрактограмма образца $\text{Sr}_{1,5}\text{La}_{0,5}\text{FeMoO}_{6-\delta}$, синтезированного из прекурсоров $\text{Sr}_{0,5}\text{La}_{0,5}\text{FeO}_3$ и SrMoO_4 при комбинированных режимах отжига и закаленного при комнатной температуре. На вставке представлена температурная зависимость намагниченности полученного образца $\text{Sr}_{1,5}\text{La}_{0,5}\text{FeMoO}_{6-\delta}$

При этих условиях синтеза величина намагниченности составляет $40,9 \text{ A}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$ при $T = 77$ К в магнитном поле $0,86$ Тл, а температура Кюри – 450 К (вставка на рисунке 2.5).

Заключение

На основании изучения последовательности фазовых превращений при кристаллизации твердого раствора $\text{Sr}_{2-x}\text{La}_x\text{FeMoO}_{6-\delta}$ определена многостадийность процесса, что обусловлено сложностью фазовых превращений из-за протекания последовательно-параллельных химических реакций и низкой кинетики фазообразования. Установлено, что для минимизации кинетических трудностей и увеличения скорости роста

однофазного ферромолибдата лантана-стронция в качестве исходных реагентов необходимо использовать прекурсоры $\text{Sr}_{0,5}\text{La}_{0,5}\text{FeO}_3$ и SrMoO_4 . На основании изучения температурных зависимостей степени фазовых превращений и их производных были оптимизированы комбинированные режимы нагрева. В результате использования комбинированных режимов синтеза удалось получить однофазное соединение $\text{Sr}_{1,5}\text{La}_{0,5}\text{FeMoO}_{6-\delta}$ из прекурсоров $\text{Sr}_{0,5}\text{La}_{0,5}\text{FeO}_3$ и SrMoO_4 с температурой Кюри 450 К, величиной намагниченности $40,9 \text{ A}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$ при $T = 77$ К в магнитном поле $0,86$ Тл и с наличием сверхструктурного упорядочения катионов железа и молибдена (82%).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Serrate, D. Double perovskites with ferromagnetism above room temperature / D. Serrate, J.M. De Teresa, M.R. Ibarra / Journal of Physics: Condensed Matter. – 2007. – Vol. 19. – P. 1–86.*
2. *Hemery, E. Magnetic and transport studies of strongly correlated perovskite ceramics: Thesis of Doctor of Philosophy in Physics: 2007 / E. Hemery. – Wellington, 2007. – 84 p.*
3. *Room-temperature magnetoresistance in an oxide material with an ordered double-perovskite structure / K.-I. Kobayashi, T. Kimura, H. Sawada, K. Terakura, Y. Tokura / Nature. – 1998. – Vol. 395. – P. 677–680.*
4. *Effect of La doping on magnetotransport and magnetic properties of double perovskite $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ system / G.N. Rao, S. Roy, C.-Y. Mou, J.W. Chen // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2006. – Vol. 299, № 2. – P. 348–355.*
5. *$\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ nanosized compound with dielectric sheaths for magnetically sensitive spintronic devices / N. Kalanda, D.-H. Kim, S. Demyanov, S.-C. Yu, M. Yarmolich, A. Petrov, S.K. Oh // Current Applied Physics. – 2018. – Vol. 18, № 1. – P. 27–33.*
6. *Functional multicomponent metal oxide films based on Sr, Sn, Fe and Mo in the anodic alumina matrixes / G.G. Gorokh, A.I. Zakhlebayaeva, A.A. Lazavenka, N.A. Sobolev, V.V. Zhylynski, N.V. Bogomazova, M.V. Yarmolich, N.A. Kalanda // Phys. Status Solidi B. – 2020. – Vol. 257, № 3. – P. 1900283.*
7. *Double perovskite $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ films prepared by electrophoretic deposition / L.V. Kovalev, M.V. Yarmolich, M.L. Petrova, J. Ustarroz, H.A. Terry, N.A. Kalanda // ACS Applied Materials & Interfaces. – 2014. – Vol. 6. – P. 19201–19206.*
8. *Cobalt-free $\text{La}_{0,5}\text{Sr}_{0,5}\text{Fe}_{0,9}\text{Mo}_{0,1}\text{O}_{3-\delta}$ electrode for symmetrical SOFC running on H_2 and CO fuels / H. Cai, L. Zhang, J. Xu, J. Huang, X. Wei, L. Wang, Z. Song, W. Long // Electrochimica Acta. – 2019. – Vol. 320. – P. 134642.*
9. *Curie temperature enhancement in the double perovskite $\text{Sr}_{2-x}\text{La}_x\text{FeMoO}_6$ system: an experimental study / B. Aguiar, T.E. Soto, J. de la Torre Medina // Physica B: Condensed Matter. – 2019. – Vol. 556. – P. 108–113.*

10. Stöhr, J. Magnetism: from fundamentals to nanoscale dynamics / J. Stöhr, H.C. Siegmann. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2006. – 820 p.
11. Effect of La doping on the properties of $\text{Sr}_{2-x}\text{La}_x\text{FeMoO}_6$ double perovskite / A. Kahoul, A. Aziz, S. Colis, D. Stoelfer, R. Moubah, G. Schmerber, C. Leuvrey, A. Dinia // Journal of Applied Physics. – 2008. – Vol. 104. – P. 123903.
12. Curie temperature enhancement in partially disordered $\text{Sr}_2\text{FeReO}_6$ double perovskites / M. Retuerto, M.J. Martinez-Lope, M. Garcia-Hernandez, J.A. Alonso // Mater. Res. Bull. – 2009. – Vol. 44. – P. 1261–1264.
13. Increase of Curie temperature with La doping in the double perovskite $\text{Sr}_{2-v}\text{La}_v\text{FeMoO}_6$ within an electronic correlation approach / F.E. Chavez, E.J. Guzman, B. Aguilar, O. Navarro, M. Avignon // Revista Mexicana de Física. – 2018. – Vol. 64, № 2. – P. 145–149.
14. Signature of an antiferromagnetic metallic ground state in heavily electron-doped $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ / S. Jana, C. Meneghini, P. Sanyal, S. Sarkar, T. Saha-Dasgupta, O. Karis, S. Ray // Physical Review B. – 2012. – Vol. 86. – P. 054433.
15. Sanyal, P. Evidence of kinetic-energy-driven antiferromagnetism in double perovskites: a first-principles study of La-doped $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ / P. Sanyal, H. Das, T. Saha-Dasgupta // Physical Review B. – 2009. – Vol. 80, № 22. – P. 224412.
16. Cationic ordering control of magnetization in $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ double perovskite / Ll. Balcels, J. Navarro, M. Bibes, A. Roig, B. Martinez, J. Fontcuberta // Applied Physics Letters. – 2001. – Vol. 78, № 6. – P. 781–783.
17. Effect of disorder on the electronic structure of the double perovskite $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ / R. Allub, O. Navarro, M. Avignon, B. Alascio // Physica B: Condensed Matter. – 2002. – Vol. 320, № 1. – P. 13–17.
18. Correlation between anti-site disorder and magnetic properties in ordered perovskite $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ / B. Park, H. Han, J. Kim, Y.J. Kim, C.S. Kim, B.W. Lee // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2004. – Vols. 272–276. – P. 1851–1852.
19. Charge transfer and disorder in double perovskites / N. Menéndez, M. Garcia-Hernandez, D. Sanchez, J.D. Tornero, J.L. Martinez, J.A. Alonso // Chemistry of Materials. – 2004. – Vol. 16. – P. 3565–3572.
20. Sarma, D.D. A new class of magnetic materials: $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ and related compounds / D.D. Sarma // Current Opinion in Solid State and Materials Science. – 2001. – Vol. 5. – P. 261–268.
21. Electronic structure of half-metallic double perovskites / Z. Szotek, W.M. Temmerman, A. Svane, L. Petit, H. Winter // Physical Review B. – 2003. – Vol. 68. – P. 104411.
22. Electronic Structure of $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ / D.D. Sarma, P. Mahadevan, T. Saha-Dasgupta, S. Ray, A. Kumar // Physical Review Letters. – 2000. – Vol. 85, № 12. – P. 2549–2552.
23. Evidence for valence fluctuation of Fe in $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-w}$ double perovskite / J. Lindén, T. Yamamoto, M. Karppinen, H. Yamauchi, T. Pietari // Applied Physics Letters. – 2000. – Vol. 76, № 20. – P. 2925–2927.
24. Bulk-sensitive photoemission spectroscopy of A_2FeMoO_6 double perovskites (A = Sr, Ba) / J.-S. Kang, J.H. Kim, A. Sekiyama, S. Kasai, S. Suga, S.W. Han, K.H. Kim, T. Muro, Y. Saitoh, C. Hwang, C.G. Olson, B.J. Park, B.W. Lee, J.H. Shim, J.H. Park, B.I. Min // Physical Review B. – 2002. – Vol. 66. – P. 113105.
25. Charge ordering and magnetic properties in nanosized $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ powders / M. Yarmolich, N. Kalanda, S. Demyanov, Ju. Fedotova, V. Bayev, N. Sobolev // Physica Status Solidi B. – 2016. – Vol. 253, № 11. – P. 2160–2166.
26. Effect of preparation procedure on the magnetic and transport properties of double perovskite $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ / W. Jin-Hui, Y. Zhi, L. Gong-Qiang, D. You-Wei // Chin. Phys. Soc. – Vol. 13, № 1. – P. 90–94.
27. Fang, T.-T. Formation kinetics of $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ double perovskite / T.-T. Fang, J.-C. Lin // Journal of Materials Science. – 2005. – Vol. 40. – P. 683–686.
28. Влияние условий синтеза на структурные и магнитотранспортные свойства $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ / Н.А. Каланда, М.В. Ярмолич, А.М. Панасевич, Д.А. Кривченя // Известия НАН Беларуси (серия физ.-мат. наук). – 2015. – № 2. – С. 82–85.
29. Characterization of ferromagnetic double perovskite $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ prepared by various methods / M. Cernea, F. Vasiliu, C. Bartha, C. Plapcianu, I. Merconiu // Ceramics International. – 2014. – Vol. 40. – P. 11601–11609.
30. Influence of successive sintering treatments on high ordered $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ double perovskite properties / B. Jurca, J. Berthon, N. Dragoe, P. Berthet // Journal of Alloys and Compounds. – 2009. – Vol. 474. – P. 416–423.
31. Kraus, W. POWDER CELL – a program for the representation and manipulation of crystal structures and calculation of the resulting X-ray powder patterns / W. Kraus, G. Nolze // Journal of Applied Crystallography. – 1996. – Vol. 29, № 3. – P. 301–303.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, проекты Ф23МЭ-025, Ф24В-005 и Ф24МН-009.

Поступила в редакцию 16.01.2024.

Информация об авторах

Ярмолич Марта Викторовна – к.ф.-м.н., доцент
Каланда Николай Александрович – д.ф.-м.н., доцент
Петров Александр Владимирович – к.ф.-м.н., доцент
Лазарук Сергей Константинович – д.ф.-м.н., профессор
Семченко Алина Валентиновна – к.ф.-м.н., доцент
Сангаа Делег – д.ф.-м.н., профессор
Мунхицэг Самбуу – к.ф.-м.н., доцент