

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ**MATERIALS SCIENCES, METALLURGY**УДК 537.311;537.638.214
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-2-135-143>Поступила в редакцию 31.03.2022
Received 31.03.2022**С. С. Аплеснин¹, О. Б. Романова¹, А. И. Галяс², А. М. Живулько², К. И. Янушкевич²**¹*Институт физики имени Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук,
Красноярск, Российская Федерация*²*Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению,
Минск, Беларусь***УСЛОВИЯ СИНТЕЗА, КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА И МАГНИТНЫЕ
СВОЙСТВА СЕЛЕНИДОВ Mn–Tm–Se**

Аннотация. Методом реакций в твердой фазе синтезированы однофазные составы в квазибинарном разрезе MnSe–TmSe. Кристаллическая структура поликристаллических порошков изучена в $\text{CuK}\alpha$ -излучении. Установлено, что образцы в интервале концентраций $0 \leq x \leq 0,7$ имеют кубическую структуру пространственной группы $Fm\bar{3}m$. Изменение концентрации катионов Tm в составах $\text{Mn}_{1-x}\text{Tm}_x\text{Se}$ приводит к увеличению параметра a элементарной кристаллической ячейки от 0,547 нм для состава $\text{Mn}_{0,975}\text{Tm}_{0,025}\text{Se}$ до 0,566 нм у состава $\text{Mn}_{0,3}\text{Tm}_{0,7}\text{Se}$. Методом «flash» на подложках оптически прозрачного стекла синтезированы тонкие слои твердых растворов $\text{Mn}_{1-x}\text{Tm}_x\text{Se}$. Толщины пленок заключены в интервале значений от 0,8 до 3,2 мкм. Установлено, что пленки $\text{Mn}_{1-x}\text{Tm}_x\text{Se}$ также обладают сингонией NaCl, S.G.: $Fm\bar{3}m$. Состав пленок $\text{Mn}_{1-x}\text{Tm}_x\text{Se}$ соответствует химическому составу порошков шихты MnSe–TmSe. В интервале температур ~ 80 – 900 К измерены величины удельной намагниченности и магнитной восприимчивости исследуемых селенидов. Полученные результаты позволяют определить температурные режимы синтеза новых магнитных полупроводниковых веществ, в том числе в пленочном состоянии. Синтезированные вещества могут быть использованы в устройствах микроэлектроники многофункционального назначения, а также при разработке новых материалов, способных работать в широких интервалах температур и при воздействии внешних магнитных полей.

Ключевые слова: халькогениды, твердые растворы, кристаллическая структура, магнитные свойства**Для цитирования:** Условия синтеза, кристаллическая структура и магнитные свойства селенидов Mn–Tm–Se / С. С. Аплеснин [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2022. – Т. 67, №2. – С. 135–143. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-2-135-143>**Sergey S. Aplesnin¹, Oksana B. Romanova¹, Anatoly I. Galyas², Aliona M. Zhivulko², Kazimir I. Yanushkevich²**¹*Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center KSC Siberian Branch Russian Academy of Sciences,
Krasnoyarsk, Russian Federation*²*Scientific-Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus***SYNTHESIS CONDITIONS, CRYSTAL STRUCTURE AND MAGNETIC PROPERTIES
OF Mn–Tm–Se SELENIDES**

Abstract. Single-phase compositions in the MnSe–TmSe quasi-binary section have been synthesized by the method of reactions in the solid phase. The crystal structure of polycrystalline powders has been studied in $\text{CuK}\alpha$ -radiation. It was found that the samples in the concentration range $0 \leq x \leq 0.7$ have a cubic structure of the space group $Fm\bar{3}m$. An increase in the concentration of Tm cations in the $\text{Mn}_{1-x}\text{Tm}_x\text{Se}$ compositions leads to an increase in the unit cell parameter a from 0.547 nm for the $\text{Mn}_{0,975}\text{Tm}_{0,025}\text{Se}$ compound to 0.566 nm for the $\text{Mn}_{0,3}\text{Tm}_{0,7}\text{Se}$ composition. Thin layers of $\text{Mn}_{1-x}\text{Tm}_x\text{Se}$ solid solutions were synthesized by the flash method on optically transparent glass substrates. The film thicknesses are in the range of values from 0.8 to 3.2 μm . It has been established that $\text{Mn}_{1-x}\text{Tm}_x\text{Se}$ films also have the system NaCl, S.G.: $Fm\bar{3}m$. The composition of the $\text{Mn}_{1-x}\text{Tm}_x\text{Se}$ films corresponds to the chemical composition of the MnSe–TmSe charge powders. In the temperature range ~ 80 – 900 K, the values of the specific

magnetization and magnetic susceptibility of the studied selenides were measured. The results obtained make it possible to determine the temperature regimes for the synthesis of new magnetic semiconductor substances, including those in the film state. The synthesized substances can be used in multifunctional microelectronic devices, as well as in the development of new materials capable of operating in wide temperature ranges and under the influence of external magnetic fields.

Keywords: chalcogenides, solid solutions, crystal structure, magnetic properties

For citation: Aplesnin S. S., Romanova O. B., Galyas A. I., Zhivulko A. M., Yanushkevich K. I. Synthesis conditions, crystal structure and magnetic properties of Mn–Tm–Se selenides. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2022, vol. 67, no. 2, pp. 135–143 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-2-135-143>

Введение. Разработка и изучение свойств новых составов веществ, обладающих сильной взаимосвязью между магнитной, электронной и упругой подсистемами, что проявляется в виде магнитоэлектрических и магниторезистивных эффектов вблизи комнатных температур, представляет интерес как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения [1, 2]. Наличие магнитоэлектрических и магниторезистивных эффектов в веществе создает условия для изготовления эффективных сенсоров, расширяя элементную базу в микроэлектронике, которая позволяет реализовать преимущества энергонезависимой магнитной памяти и быстродействующих электрических систем обработки информации [2]. Для преобразования электрического сигнала используется не только зарядовая степень свободы электрона, но и спин, что применяется при разработке спинтронных устройств нового поколения [3–5].

Перспективно использование полупроводников с неоднородными электронными состояниями и с орбитальным упорядочением электронов. В этом случае перенос носителей заряда осуществляется по определенному типу орбиталей, положение которых относительно химического потенциала можно изменять электрическими и магнитными полями, а также упругими напряжениями. Экспериментальные исследования магнитных и электрических свойств и расчеты с использованием формулы Троттера в «Монте-Карло процедуре» демонстрируют, что перспективными материалами для решения этих задач могут быть магнитные полупроводники на основе халькогенидов марганца [2, 6].

Цель работы – синтез, изучение структурных и магнитных свойств твердых растворов селенидов $Mn_{1-x}Tm_xSe$.

Объекты эксперимента, синтез и методики. Объектами настоящего исследования являлись составы на основе халькогенидов Tm–Mn–Se. Моноселенид марганца обладает кубической сингонией типа NaCl, пространственной группы $Fm\bar{3}m$ с параметром элементарной кристаллической ячейки $a = 0,5456$ нм. Известно, что селенид тулия также кристаллизуется в кубической сингонии типа NaCl, пространственной группы $Fm\bar{3}m$ с параметром элементарной кристаллической ячейки $a = 0,5640$ нм [7]. Температура плавления селенида тулия $T_{пл} \sim 2333$ К. При температурах ~ 2003 и ~ 1373 К имеют место кристаллические фазовые превращения второго рода. Селенид тулия так же, как и селенид марганца, является антиферромагнетиком, только с низкой температурой Нееля. Различие в $\sim 4\%$ в величинах параметров элементарных ячеек позволяет предположить о возможности существования широкой области твердых растворов в квазибинарном разрезе MnSe–TmSe. Этим обоснован выбор объектов для синтеза, изучения кристаллической структуры и фазового состояния твердых растворов системы $Mn_{1-x}Tm_xSe$, полученных при различных режимах реакций в твердой фазе и отжиге образцов после первичного спекания [8–15].

Синтез образцов системы $Mn_{1-x}Tm_xSe$ выполнен в лаборатории физики магнитных материалов Научно-практического центра Национальной академии наук Беларуси по материаловедению методом твердофазных реакций в определенной последовательности. Так, необходимые количества порошков марганца, тулия и селена тщательно перемешивались и загружались в кварцевые ампулы с последующим вакуумированием до 10–20 Па. Поскольку селен имеет точку кипения 950 К, выше которой резко возрастает давление паров, то во избежание взрыва ампул был принят ступенчатый режим синтеза. Первые 24 ч поддерживалась температура 670–720 К. Далее ампулы выдерживались при температуре 870–970 К. После этого температура поднималась до 1370 К, и через 2 ч следовала закалка ампул в воде.

Полученные спеки представляли собой рыхлые непрочные слитки от черного (для составов с преобладанием марганца) до серого цвета или спекшиеся порошки с укрупненным зерном.

Синтезированные таким образом вещества подвергались гомогенизирующему отжигу при температуре 1120 К с последующей закалкой.

Отжиг и закалка позволили получить более качественные образцы без примеси посторонней фазы. Синтезированные таким образом слитки имели серовато-серебристый цвет и были достаточно прочными. После каждого этапа синтеза проводились рентгеноструктурные исследования в $\text{CuK}\alpha$ -излучении с целью выявления оптимальных энергосберегающих условий синтеза новых материалов, перспективных для практических применений. Тонкие слои селенидов $\text{Mn}_{1-x}\text{Tm}_x\text{Se}$ (от 0,8 до 3,2 мкм) синтезировали методом термического испарения «flash» на промышленной установке при парциальной подаче порошка испаряемого вещества с размером зерна 0,1–0,3 мм на танталовый испаритель, имевший температуру ~ 2273 °С.

Морфология поверхности и химический состав пленок исследовались методами сканирующей электронной микроскопии (scanning electron microscopy, SEM) и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (energy dispersive X-ray spectroscopy, EDS). Пондеромоторным методом в интервале температур 80–900 К и в магнитном поле с индукцией 0,86 Тл были измерены удельная намагниченность и магнитная восприимчивость исследуемых составов.

Результаты эксперимента и их обсуждение. На рис. 1 приведены рентгенограммы образцов системы $\text{Mn}_{1-x}\text{Tm}_x\text{Se}$ ($x = 0,025; 0,05; 0,075; 0,1; 0,3; 0,5$) при различных концентрациях замещения в катионной подрешетке до и после гомогенизирующего отжига.

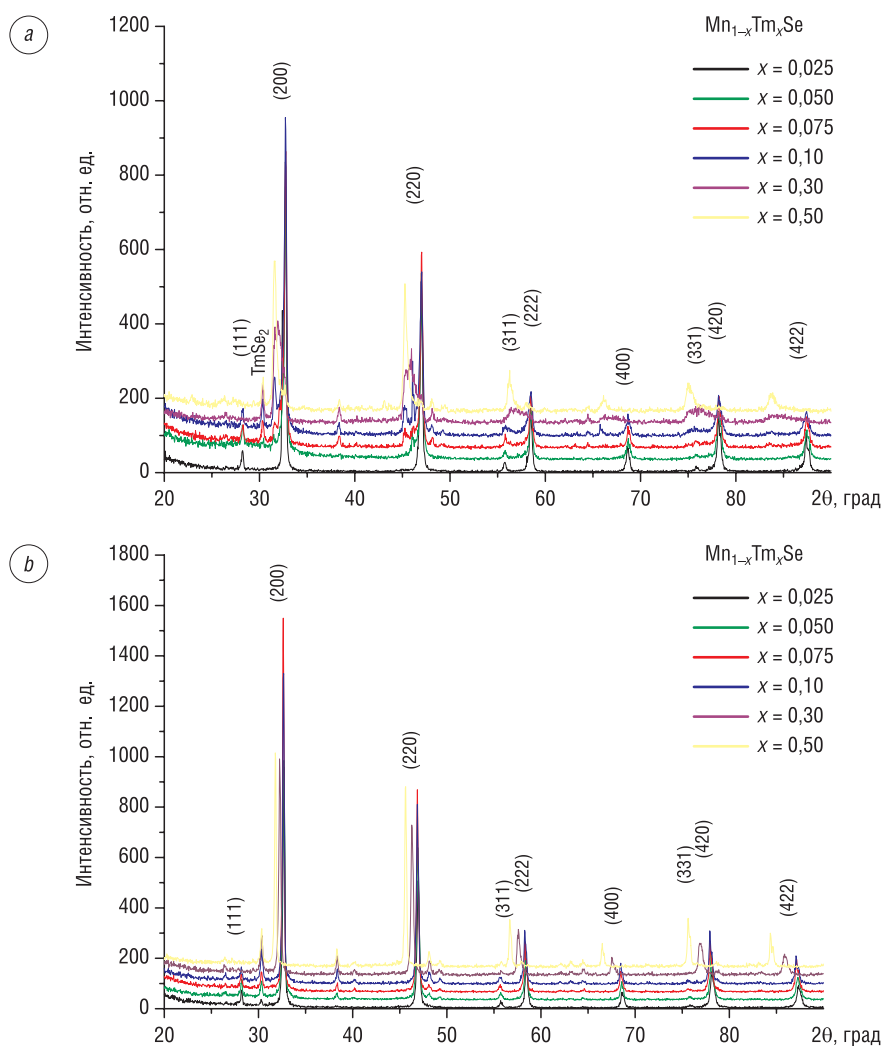


Рис. 1. Рентгенограммы твердых растворов системы $\text{Mn}_{1-x}\text{Tm}_x\text{Se}$ до (а) и после (б) гомогенизирующего отжига

Fig. 1. X-ray diffraction patterns of solid solutions of the $\text{Mn}_{1-x}\text{Tm}_x\text{Se}$ system before (a) and after (b) homogenizing annealing

На рис. 2 представлены рентгенограммы тонких пленок твердых растворов $Mn_{1-x}Tm_xSe$ на примере составов с $x = 0,05; 0,10$.

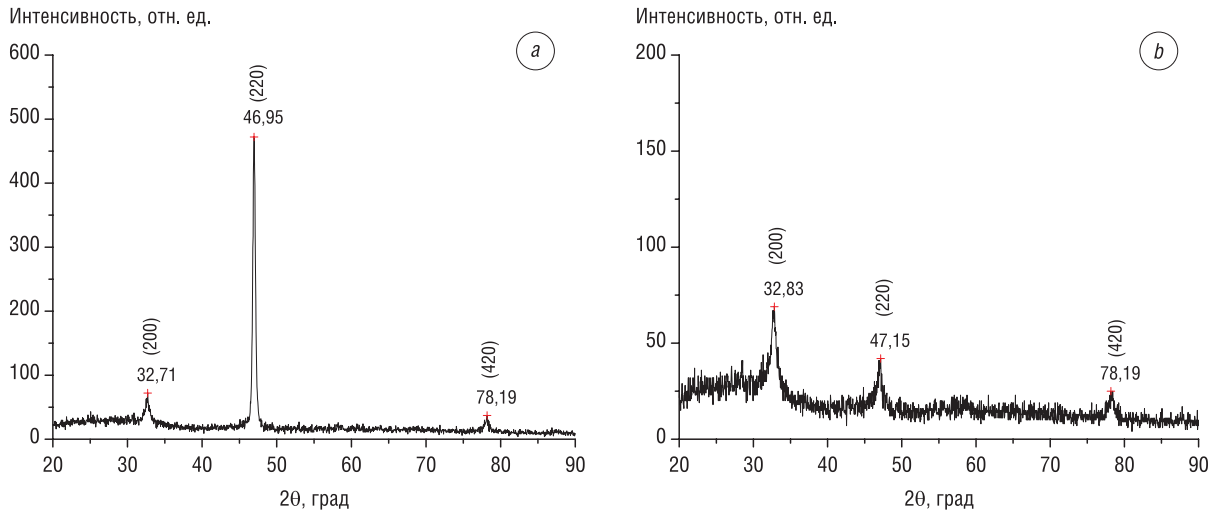


Рис. 2. Рентгенограммы тонких пленок $Mn_{0,95}Tm_{0,05}Se$ (a) и $Mn_{0,9}Tm_{0,1}Se$ (b)

Fig. 2. X-rays of $Mn_{0,95}Tm_{0,05}Se$ (a) and $Mn_{0,9}Tm_{0,1}Se$ (b) thin films

Результаты изучения морфологии поверхности и химического состава пленок методами SEM (рис. 3) и EDS показали, что пленки однородны и состав их соответствует химическому составу порошков шихты.

В итоге эксперимента, проведенного с использованием указанных методов, установлено, что в системе $Mn_{1-x}Tm_xSe$ в интервале концентраций $0 \leq x < 0,7$ образуются твердые растворы с кубической структурой пространственной группы $Fm\bar{3}m$. По результатам анализа дифрактограмм рентгеновских исследований определен параметр a кубической элементарной ячейки синтезированных составов (таблица).

Первоначально размеры элементарной ячейки были определены по соотношению, которое связывает параметры элементарной ячейки с величиной межплоскостного расстояния в соответствии с условием Вульфа–Брэгга:

$$a = \frac{\lambda \sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}{2 \sin \theta_{hkl}}, \quad (1)$$

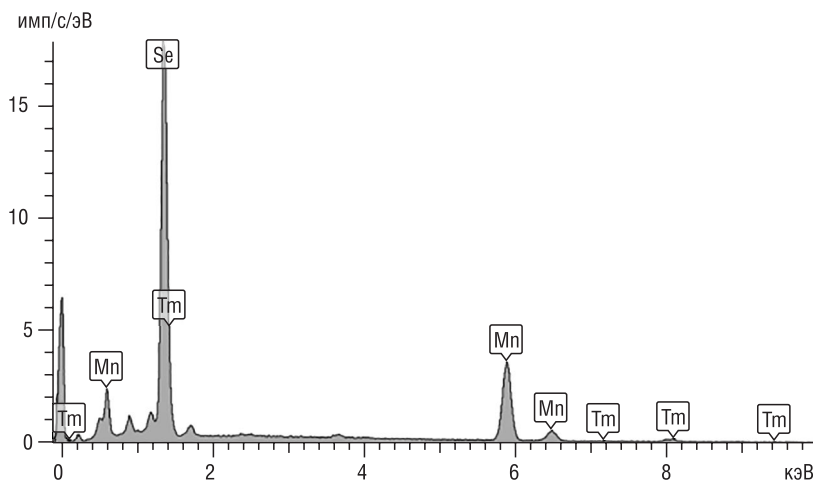


Рис. 3. Результат SEM пленки $Mn_{0,95}Tm_{0,05}Se$

Fig. 3. SEM result of $Mn_{0,95}Tm_{0,05}Se$

Параметр a элементарной ячейки твердых растворов $Mn_{1-x}Tm_xSe$
Unit cell parameter a of $Mn_{1-x}Tm_xSe$ solid solutions

x	a , нм
0	0,546 ₈
0,025	0,547 ₅
0,05	0,547 ₆
0,075	0,548 ₆
0,1	0,549
0,2	0,553 ₃
0,3	0,555
0,4	0,558 ₂
0,6	0,563 ₇
0,7	0,566 ₄

где λ – длина волны CuK_α -излучения; h, k, l – индексы Миллера для данного рефлекса; θ_{hkl} – угол, под которым наблюдается рефлекс.

Для уточнения значений параметра элементарной кристаллической ячейки выполнен полнопрофильный анализ методом Ритвельда [15], который положен в основу программы FullProf. Погрешность полученных значений составила $\pm 0,002$ нм.

Содержание таблицы свидетельствует, что увеличение концентрации катионов Tm в твердых растворах $\text{Mn}_{1-x}\text{Tm}_x\text{Se}$ приводит к увеличению параметра a от 0,547 нм для состава $\text{Mn}_{0,975}\text{Tm}_{0,025}\text{Se}$ до 0,566 нм для состава $\text{Mn}_{0,3}\text{Tm}_{0,7}\text{Se}$. Соответственно увеличивается и объем элементарной кристаллической ячейки. Концентрационная зависимость параметра a элементарной кристаллической ячейки $a = f(x)$ представлена на рис. 4.

Результаты эксперимента по изучению кристаллической структуры синтезированных составов в квазибинарном разрезе MnSe–TmSe указывают на отсутствие непрерывного ряда твердых растворов. Основные предпосылки для ограничения пределов растворимости исследуемых селенидов следующие: достаточно большая разница температур плавления марганца и тулия; различная активность химического взаимодействия халькогена Se с катионами Mn и Tm; различие в ионных радиусах Mn и Tm; наличие многовалентных состояний в Mn; предпочтительное образование фазы TmSe_2 при протекании диффузионных процессов высокотемпературного синтеза.

Поскольку главная отличительная особенность ферромагнетиков – обладание намагниченностью при отсутствии воздействия внешнего магнитного поля, то первоначально ставилась задача определения величины удельной намагниченности и магнитной восприимчивости синтезированных поликристаллических порошков составов и изучение их температурных зависимостей для разных составов по содержанию элемента тулия. Поскольку магнетизм конкретных атомов базируется на наличии спина у электронов, орбитальных моментов – у электронов и возможности изменений в орбитальных моментах, индуцированных внешним магнитным полем, то важно выявить новые закономерности и особенности взаимосвязи между ними в результате внешних энергетических воздействий, сопровождающихся фазовыми превращениями.

Результаты эксперимента по изучению температурных зависимостей удельной намагниченности и удельной магнитной восприимчивости поликристаллических порошков составов $\text{Mn}_{1-x}\text{Tm}_x\text{Se}$ и пленок свидетельствуют об изменении величин магнитных характеристик вещества с увеличением содержания тулия при катионном замещении.

На рис. 5 представлены температурные зависимости удельной намагниченности порошков твердых растворов $\text{Mn}_{1-x}\text{Tm}_x\text{Se}$ ($x = 0,05; 0,1; 0,2; 0,3$).

При температуре ~ 80 К, когда тепловые колебания атомов в узлах элементарной кристаллической ячейки значительно ослаблены, величина удельной намагниченности порошков изменяется от $0,64 \text{ A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{кг}^{-1}$ для образца с концентрацией $x = 0,05$ до $2,24 \text{ A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{кг}^{-1}$ для образца с концентрацией $x = 0,7$.

Следует отметить, что ход температурных зависимостей удельной намагниченности, а также зависимостей $10^{-2}/\chi = f(T)$ идентичен при измерениях в режиме «нагрев-охлаждение», при этом магнитные характеристики исследуемых составов сохраняют свои величины и устойчивы к прогреву до температуры ~ 900 К. Выявленная особенность имеет практическое значение: использование впервые синтезированных новых веществ в приборных матрицах может обеспечить их устойчивую работу в широком интервале температур.

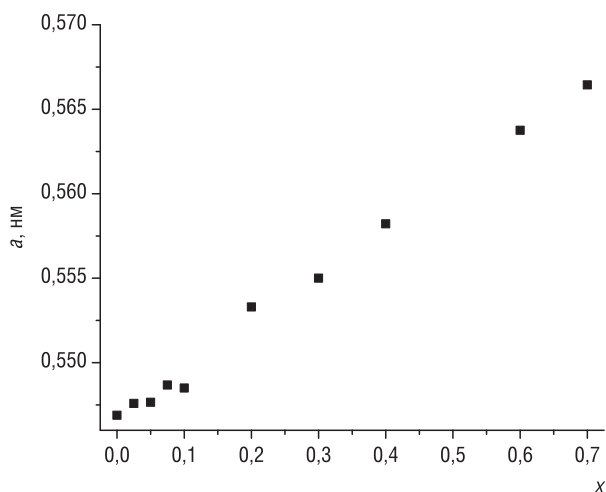


Рис. 4. Концентрационная зависимость параметра a элементарной кристаллической ячейки твердых растворов системы $\text{Mn}_{1-x}\text{Tm}_x\text{Se}$

Fig. 4. Concentration dependence of the parameter a of the unit cell of solid solutions of the $\text{Mn}_{1-x}\text{Tm}_x\text{Se}$ system

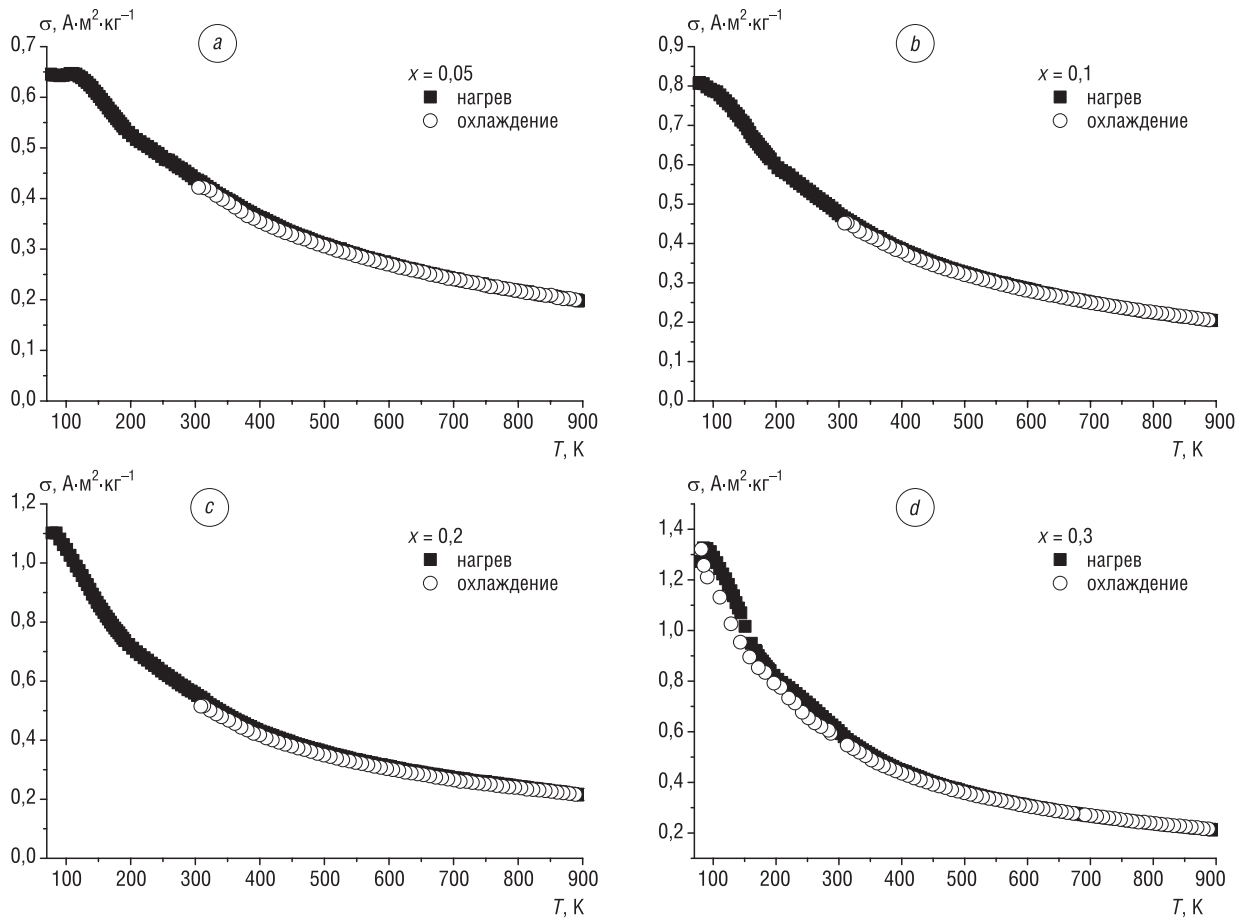


Рис. 5. Температурные зависимости удельной намагниченности твердых растворов $Mn_{1-x}Tm_xSe$: $a - x = 0,05$; $b - x = 0,1$; $c - x = 0,2$; $d - x = 0,3$

Fig. 5. Temperature dependences of the specific magnetization of solid solutions $Mn_{1-x}Tm_xSe$: $a - x = 0.05$; $b - x = 0.1$; $c - x = 0.2$; $d - x = 0.3$

В окрестности комнатных температур наблюдается аномальный ход температурных зависимостей намагниченности и магнитной восприимчивости исследуемых составов, что, вероятнее всего, может свидетельствовать об изменениях кристаллического состояния с особенностями взаимодействия и упорядочения ионов как в анионной, так и катионной подрешетках.

На рис. 6 представлены температурные зависимости удельной намагниченности пленок $Mn_{1-x}Tm_xSe$ составов с концентрацией $x = 0,05$; $0,1$. При температурах вблизи жидкого азота величины удельной намагниченности исследуемых составов имеют, соответственно, значения: $\sigma \approx 0,08 \text{ A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ и $\sigma \approx 0,09 \text{ A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$.

При изменении концентрации содержания в пленках тулия всего на 5 % происходит увеличение удельной намагниченности на $0,1 \text{ A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$. Имеет место и различие в ходе температурных зависимостей $\sigma = f(T)$ в интервале температур $80 \text{ K} \leq T \leq 150 \text{ K}$.

Последнее свидетельствует об изменении обменных магнитных взаимодействий между катионами в тонких слоях с введением в состав небольшой концентрации тулия. Измерения удельной намагниченности пленок в интервале температур $\sim 80 \text{ K} \leq T \leq 350 \text{ K}$ позволяют определить величину среднего магнитного момента пленок в единицах магнетона Бора для любой температурной точки этого интервала, используя соотношение

$$\mu_{\text{midl}} = \frac{\sigma M}{N_A} \mu_B, \quad (2)$$

где N_A – число Авогадро, μ_B – величина магнетона Бора, σ – удельная намагниченность, M – молекулярный вес.

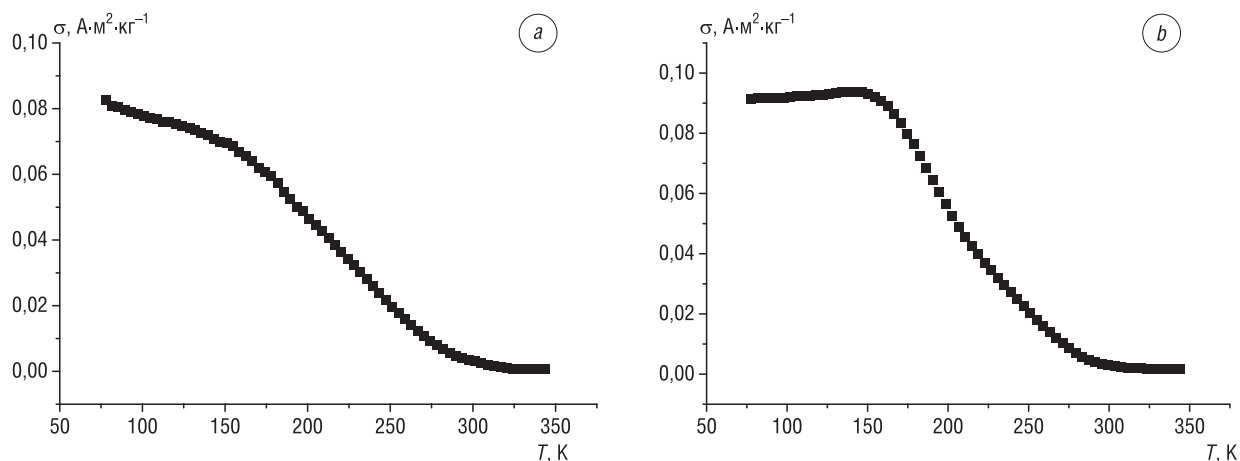


Рис. 6. Температурные зависимости удельной намагниченности тонких пленок $Mn_{0,95}Tm_{0,05}Se$ (a) и $Mn_{0,9}Tm_{0,1}Se$ (b)
 Fig. 6. Temperature dependences of the specific magnetization of thin films $Mn_{0,95}Tm_{0,05}Se$ (a) and $Mn_{0,9}Tm_{0,1}Se$ (b)

Температурные зависимости $\sigma = f(T)$ в интервале $\sim 80\text{ K} \leq T \leq 350\text{ K}$ позволяют наблюдать проявление слабого ферромагнитного взаимодействия при $T < 300\text{ K}$ с величинами среднего магнитного момента $\mu_{midl} = 2,02 \cdot 10^{-3}\ \mu_B$ и $\mu_{midl} = 2,38 \cdot 10^{-3}\ \mu_B$ в разрезе $MnSe-TmSe$. Установлено, что средний магнитный момент тонких пленок увеличился при допировании селенида марганца тулием.

Эксперимент по изучению температурных зависимостей удельной намагниченности поликристаллических порошков и тонких пленок составах $Mn_{1-x}Tm_xSe$ при замещении катионов марганца тулием убедительно демонстрирует, что имеет место возникновение слабого ферромагнитного взаимодействия в антиферромагнитной матрице селенида марганца.

Заключение. Методом реакций в твердой фазе синтезированы селениды $Mn_{1-x}Tm_xSe$ ($0 \leq x \leq 0,7$) с кубической структурой пространственной группы $Fm\bar{3}m$. Увеличение концентрации катионов Tm приводит к увеличению параметра a элементарной ячейки от $0,547\text{ нм}$ для состава $Mn_{0,975}Tm_{0,025}Se$ до $0,566\text{ нм}$ для состава $Mn_{0,3}Tm_{0,7}Se$. Методом «flash» синтезированы тонкие слои $Mn_{1-x}Tm_xSe$. Толщины пленок заключены в интервале значений от $0,8$ до $3,2\text{ мкм}$. Определены величины удельной намагниченности и магнитной восприимчивости твердых растворов $Mn_{1-x}Tm_xSe$ ($0 \leq x \leq 0,7$) в интервале температур $\sim 80-900\text{ K}$. Установлено, что величина удельной намагниченности при температуре $\sim 80\text{ K}$ изменяется от $0,64\text{ A}\cdot\text{м}^2\cdot\text{кг}^{-1}$ для образца с концентрацией $x = 0,05$ до $2,24\text{ A}\cdot\text{м}^2\cdot\text{кг}^{-1}$ – для образца с концентрацией $x = 0,7$.

Разработана методика синтеза новых магнитных полупроводниковых веществ, в том числе и в пленочном состоянии. Новые вещества можно использовать в устройствах микроэлектроники многофункционального назначения. Режимы синтеза и свойства новых материалов могут служить справочной информацией для технологов электронной промышленности, при разработке новых перспективных материалов, способных работать в широких интервалах температур и воздействия внешних магнитных полей.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № T20P-052) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект №20-52-00005 Bel_a).

Acknowledgements

This work was supported by the Belarusian Republican Foundation for Basic Research (project no. T20R-052) and the Russian Foundation for Basic Research (project no. 20-52-00005 Bel_a).

Список использованных источников

1. Звездин, А.К. Фазовые переходы и гигантский магнитоэлектрический эффект в мультиферроиках / А.К. Звездин, А.П. Пятаков // Успехи физ. наук. – 2004. – Т. 174, №4. – С. 465–470. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0174.200404n.0465>
2. Аплеснин, С.С. Магнитные и электрические свойства сильнокоррелированных магнитных полупроводников с четырехспиновым взаимодействием и с орбитальным упорядочением / С.С. Аплеснин. – М.: Физматлит, 2013. – 176 с.

3. Interface-induced phenomena in magnetism / F. Hellman [et al.] // *Rev. Mod. Physics*. – 2017. – Vol. 89, iss. 2. – 025006. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.89.025006>
4. Фетисов, Ю. К. Спинтроника: физические основы и устройства / Ю. К. Фетисов, А. С. Сигов // *Радиоэлектроника, Наносистемы. Информационные технологии (РЭНСИТ)*. – 2018. – Т. 10, № 3. – С. 343–356. <https://doi.org/10.17725/rensit.2018.10.343>
5. Spintronics based random access memory: a review / S. Bhatti [et al.] // *Mater. Today*. – 2017. – Vol. 20, № 9. – P. 530–548. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2017.07.007>
6. Электрофизические свойства поликристаллических пленок $\text{BiFe}_{0.95}\text{Co}_{0.05}\text{O}_3$ / О. Б. Романова [и др.] // *Физика твердого тела*. – 2021. – Т. 63, вып. 6. – С. 721–728. <https://doi.org/10.21883/FTT.2021.06.50928.015>
7. MnSe: Rocksalt versus zinc-blende structure / Hyuning Kim [et al.] // *Phys. Rev. B*. – 1998. – Vol. 58, № 11. – P. 6700–6703. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.58.6700>
8. Magnetic and some thermal properties of chalcogenides of Pr and Tm and a few other rare earths / E. Bucher [et al.] // *Phys. Rev. B*. – 1975. – Vol. 11, № 1. – P. 500–513. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.11.500>
9. Диаграммы состояния двойных металлических систем / под ред. Н. П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 2000. – Т. 3, кн. 2. – 448 с.
10. Predel, B. Se-Tm (Selenium-Thulium) [Electronic Resource] / B. Predel // *Phase Equilibria, Crystallographic and Thermodynamic Data of Binary Alloys Pu-Re – Zn-Zr* / ed. O. Madelung. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1998. Mode of access: https://materials.springer.com/lb/docs/sm_lbs_978-3-540-70705-9_2721. https://doi.org/10.1007/10551312_2721
11. CRC Handbook of Chemistry and Physics. – 89th ed. – Taylor and Francis Group, LLC, 2008–2009.
12. Диаграммы состояния двойных металлических систем / под ред. Н. П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 2001. – Т. 3, кн. 1. – 972 с.
13. Янушкевич, К. И. Твердые растворы монохалькогенидов 3d-металлов / К. И. Янушкевич. – Минск: Изд. центр, 2009. – 230 с.
14. Магнитные фазовые переходы и кинетические свойства халькогенидов 3d-металлов / С. С. Аплеснин [и др.]. – Красноярск: Сиб. гос. фэрокозм. ун-т., 2017. – 208 с.
15. Rietveld refinement of powder X-ray diffraction, microstructural and mechanical studies of magnesium matrix composites processed by high-energy ball milling / T. Ramkumar [et al.] // *J. Magn. Alloys*. – 2018. – Vol. 6, № 4. – P. 390–398. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2018.08.002>

References

1. Zvezdin A. K., Pyatakov A. P. Phase transitions and the giant magnetoelectric effect in multiferroics. *Physics–Uspekhi*, 2004, vol. 47, no. 4, pp. 416–421. <http://doi.org/10.1070/PU2004v047n04ABEH001752>
2. Aplesnin S. S. *Magnetic and Electrical Properties of Strongly Correlated Magnetic Semiconductors with Four-Spin Interaction and Orbital Ordering*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2013. 176 p. (in Russian).
3. Hellman F., Hoffman A., Tserkovnyak Y. et al. Interface-induced phenomena in magnetism. *Reviews of Modern Physics*, 2017, vol. 89, iss. 2, 025006. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.89.025006>
4. Fetisov Y. K., Sigov A. S. Spintronics: physical foundations and devices. *Radioelektronika, Nanosistemy, Informacionnyye Tehnologii = RENSIT*, 2018, vol. 10, no. 3, pp. 343–356 (in Russian). <https://doi.org/10.17725/rensit.2018.10.343>
5. Bhatti S., Sbiaa R., Hirohata A., Ohno H., Fukami S., Piramanayagam S. N. Spintronics based random access memory: a review. *Materials Today*, 2017, vol. 20, no. 9, pp. 530–548. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2017.07.007>
6. Romanova O. B., Kretinin V. V., Aplesnin S. S., Sitnikov M. N., Udod L. V., Yanushkevich K. I. Electrophysical properties of polycrystalline films $\text{BiFe}_{0.95}\text{Co}_{0.05}\text{O}_3$. *Physics of the Solid State*, 2021, vol. 63, iss. 6, pp. 897–903. <https://doi.org/10.1134/s1063783421060184>
7. Kim H., Vogelgesang R., Ramdas A. K., Peiris F. C., Bindley U., Furdyna J. K. MnSe: Rocksalt versus zinc-blende structure. *Physical Review B*, 1998, vol. 58, no. 11, pp. 6700–6703. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.58.6700>
8. Bucher E., Andres K., Salvo F. J. di, Maita J. P., Gossard A. C., Cooper A. S., Hull G. W., Jr. Magnetic and some thermal properties of chalcogenides of Pr and Tm and a few other rare earths. *Physical Review B*, 1975, vol. 11, no. 1, pp. 500–513. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.11.500>
9. Lyakishev N. P. (ed.). *State Diagrams of Binary Metallic Systems. Volume 3. Book 2*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2000. 448 p. (in Russian).
10. Predel B. Se-Tm (Selenium-Thulium). Madelung O. (ed.). *Phase Equilibria, Crystallographic and Thermodynamic Data of Binary Alloys Pu-Re – Zn-Zr*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1998. Available at: https://materials.springer.com/lb/docs/sm_lbs_978-3-540-70705-9_2721. https://doi.org/10.1007/10551312_2721
11. CRC Handbook of Chemistry and Physics. 89th ed. Taylor and Francis Group, LLC, 2008–2009.
12. Lyakishev N. P. (ed.). *State Diagrams of Binary Metallic Systems. Volume 3. Book 1*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2001. 972 p. (in Russian).
13. Yanushkevich K. I. *Solid Solutions of Monochalcogenides of 3d-Metals*. Minsk, Publ. Centre, 2009. 230 p. (in Russian).
14. Aplesnin S. S., Romanova O. B., Demidenko O. F., Yanushkevich K. I. *Magnetic Phase Transitions and Kinetic Properties of 3d-Metal Chalcogenides*. Krasnoyarsk, Siberian State Aerospace University, 2017. 208 p. (in Russian).
15. Ramkumar T., Selvakumar M., Vasanthsankar R., Sathishkumar A. S., Narayanasamy P., Girijab G. Rietveld refinement of powder X-ray diffraction, microstructural and mechanical studies of magnesium matrix composites processed by high-energy ball milling. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2018, vol. 6, no. 4, pp. 390–398. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2018.08.002>

Информация об авторах

Аплеснин Сергей Степанович – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории теоретической физики, Институт физики имени Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук (ул. Академгородок, 50, 660036, Красноярск, Российская Федерация). E-mail: apl@iph.krasn.ru

Романова Оксана Борисовна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории резонансных свойств магнитоупорядоченных веществ, Институт физики имени Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук (ул. Академгородок, 50, 660036, Красноярск, Российская Федерация). E-mail: rob@iph.krasn.ru

Галяс Анатолий Иванович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории физики магнитных материалов, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19-5, 220072, Минск, Республика Беларусь).

Живулько Алена Михайловна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории физики магнитных материалов, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19-5, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: alyona_panasevich@mail.ru

Янушкевич Казимир Иосифович – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории физики магнитных материалов, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19-5, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: k.yanushkevitch@yandex.by

Information about the authors

Sergey S. Aplesnin – D. Sc. (Physics and Mathematics), Leading Researcher of the Laboratory of Theoretical Physics, Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center KSC Siberian Branch Russian Academy of Sciences (50, Akademgorodok Str., 660036, Krasnoyarsk, Russian Federation). E-mail: apl@iph.krasn.ru

Oksana B. Romanova – Ph. D. (Physics and Mathematics), Senior Researcher of the Laboratory of Resonant Properties of Magnetically Ordered Substances, Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center KSC Siberian Branch Russian Academy of Sciences (50, Akademgorodok Str., 660036, Krasnoyarsk, Russian Federation). E-mail: rob@iph.krasn.ru

Anatoly I. Galyas – Ph. D. (Physics and Mathematics), Senior Researcher of the Laboratory of Physics of Magnetic Materials, Scientific-Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, room 5, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus).

Aliona M. Zhivulko – Ph. D. (Physics and Mathematics), Senior Researcher of the Laboratory of Physics of Magnetic Materials, Scientific-Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, room 5, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: alyona_panasevich@mail.ru

Kazimir I. Yanushkevich – D. Sc. (Physics and Mathematics), Senior Researcher of the Laboratory of Physics of Magnetic Materials, Scientific-Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, room 5, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: k.yanushkevitch@yandex.by