

## СПОНТАННЫЙ ЭФФЕКТ ОБМЕННОГО СМЕЩЕНИЯ В СИСТЕМЕ $\text{Fe}_{3-x}\text{Cr}_x\text{Se}_4$

Комарова В.А.<sup>1</sup>, Мозговых С.Н.<sup>1</sup>, Шерокалова Е.М.<sup>1</sup>, Селезнева Н.В.<sup>1</sup>,  
Баранов Н.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1)</sup> Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, ИЕНиМ, г. Екатеринбург, Россия

<sup>2)</sup> Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Россия  
E-mail: lera.komarova.200094@gmail.com

## SPONTANEOUS EXCHANGE BIAS EFFECT IN THE SYSTEM $\text{Fe}_{3-x}\text{Cr}_x\text{Se}_4$

Komarova V.A.<sup>1</sup>, Mozgovykh S.N.<sup>1</sup>, Sherokalova E.M.<sup>1</sup>, Selezneva N.V.<sup>1</sup>, Baranov N.V.<sup>1,2</sup>

<sup>1)</sup> Ural Federal University, Institute of Natural Sciences and Mathematics, Ekaterinburg, Russia

<sup>2)</sup> M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

The crystal structure and physical properties of the ferrimagnetic  $\text{Fe}_{3-x}\text{Cr}_x\text{Se}_4$  system are analyzed. The compound with  $x = 1$  possesses a giant spontaneous exchange bias (HEB  $\sim 6.6$  kOe), which can be ascribed to the presence of clusters with short range magnetic ordering in ferrimagnetic matrix.

Эффект обменного смещения, заключающийся в сдвиге петель магнитного гистерезиса вдоль оси магнитного поля, не перестает привлекать внимание исследователей со времен его обнаружения в 1956 году [1, 2]. Установлено, что необходимым условием обнаружения данного эффекта является наличие в материале магнитомягкой ферромагнитной (ферримагнитной) фазы и высокоанизотропной антиферромагнитной фазы. Взаимодействие на границах этих фаз приводит к однонаправленной анизотропии, к смещению петель гистерезиса. Первоначально данный эффект наблюдали только при измерении петли после охлаждения в поле, намного позже в ряде объектов был обнаружен спонтанный эффект обменного смещения, проявляющийся при охлаждении без приложения поля. Соединение  $\text{Fe}_3\text{Se}_4$  ниже 320 К является слоистым ферримагнетиком, в котором атомы железа в слое ориентированы ферромагнитно, а между слоями антиферромагнитно, при этом наличие упорядоченных вакансий в каждом втором слое железа приводит к тому, что магнитные моменты соседних слоев железа оказываются нескомпенсированы [3]. Изоструктурное соединение  $\text{Cr}_3\text{Se}_4$  является антиферромагнетиком ниже 160 К [4]. Можно предположить, что замещение атомов железа атомами хрома приведет к конкуренции различных магнитных взаимодействий и, как следствие, к формированию неоднородного

магнитного состояния. Целью данной работы является синтез и анализ физических свойств системы  $\text{Fe}_{3-x}\text{Cr}_x\text{Se}_4$  ( $x = 0; 0.25; 0.5; 0.75; 1; 1.25; 1.5$ ).

Соединения были получены методом твердофазного синтеза при температуре  $800^\circ\text{C}$  с последующим отжигом. Кристаллическая структура исследована с помощью рентгеноструктурного анализа (дифрактометр Bruker D8 Advance). Измерения намагниченности проводились в интервале температур от 2 К до 350 К в полях до 70 кЭ с помощью PPMS DynaCool компании Quantum Design.

Все полученные соединения изоструктурны исходному (пространственная группа  $I2/m$ ). При увеличении концентрации хрома параметры элементарной ячейки испытывают анизотропные изменения, объем элементарной ячейки меняется нелинейно. Эффект обменного смещения был обнаружен только в соединении  $\text{Fe}_2\text{CrSe}_4$  при охлаждении в поле и без него. Величина смещения ( $H_{\text{ЕВ}}$ ) при  $T = 2$  К достигает 6.6 кЭ, это наибольшее достигнутое значение спонтанного обменного смещения на данный момент. Эффект может быть связан с существованием в ферримагнитной матрице кластеров с ближним магнитным порядком из-за неоднородного распределения атомов хрома в катионных слоях. Для проверки этой гипотезы был проведен дополнительный отжиг при  $950^\circ\text{C}$  с последующей закалкой в лед, это привело к увеличению объема элементарной ячейки и к почти полному уничтожению эффекта смещения. Таким образом, замещение атомов железа хромом в  $\text{Fe}_3\text{Se}_4$  и термические обработки образцов позволяют существенно модифицировать их магнитные свойства.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-13-00158).*

1. Meiklejohn W. H., Bean C. P. New magnetic anisotropy //Physical Review – 1956. – Т. 102, №. 5. – С. 1413. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.102.1413>
2. Giri S., Patra M., Majumdar S. Exchange bias effect in alloys and compounds //Journal of Physics: Condensed Matter. – 2011. – Т. 23. – №. 7. – С. 073201. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/23/7/073201>
3. Lambert-Andron B., Berodias G. Etude par diffraction neutronique de  $\text{Fe}_3\text{Se}_4$  //Solid State Commun. – 1969. – Т. 7. – №. 8. – С. 623-629. [https://doi.org/10.1016/0038-1098\(69\)90631-0](https://doi.org/10.1016/0038-1098(69)90631-0)
4. Wintenberger M., André G., Hammann J. Composition and temperature dependent magnetic structures of monoclinic chromium selenides  $\text{Cr}_{3\pm x}\text{Se}_4$ ,  $x \leq 0.2$  //Journal of magnetism and magnetic materials. – 1995. – Т. 147. – №. 1-2. – С. 167-176. [https://doi.org/10.1016/0304-8853\(94\)01663-1](https://doi.org/10.1016/0304-8853(94)01663-1)