**Исследование однодоменных частиц гексаферритов М-типа, легированных алюминием, хромом, галлием, марганцем по отдельности, методом резонансной рентгеновской дифракции**

Султановская А.С.1, Горбачев Е.А.2, Бете С.3, Диннебир Р.3, Казин П.Е.2

*1 Факультет наук о материалах**МГУ им. М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Россия*

*2 Химический факультет**МГУ им. М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Россия*

*3 Институт исследований твердого тела им. Макса Планка, 70569, Штутгарт, Германия*

*sult\_alexa@mail.ru*

На сегодняшний день актуальной задачей в области материаловедения является поиск новых магнитотвердых материалов, которые могли бы стать альтернативой дорогостоящим материалам на основе сплавов редкоземельных элементов. Материалы должны обладать высокой коэрцитивной силой, содержать доступные и недорогие элементы в составе. Таким требованиям удовлетворяют гексаферриты М-типа. Это твёрдые оксидные соединения с общей формулой MFe12O19 (M = Ba, Sr, Pb). Они изоморфны магнетоплюмбиту с пространственной группой P63/*mmc*. Ионы железа расположены в пяти различных кристаллографических позициях: трёх октаэдрических (2a, 4f2, 12k), одной тетраэдрической (4f1) и одной тригонально-бипирамидальной (2b). Каждая позиция вносит уникальный вклад в поле анизотропии и намагниченность материала, поэтому магнитные свойства гексаферритов можно существенно варьировать за счет изменения их химического состава. Частичное замещение ионов железа может приводить к увеличению или уменьшению коэрцитивной силы в зависимости от распределения заместителей в кристаллической структуре. На величину коэрцитивной силы так же влияет микроструктура образца: коэрцитивная сила однодоменных частиц существенно выше, чем многодоменных.Таким образом, особый интерес представляют однодоменные гексаферриты, с частичным замещением атомов железа на другие ионы. В нашей научной группе была разработана методика синтеза однодоменных гексаферритов, глубоко легированных различными трехвалентными ионами, с помощью цитратно-нитратного метода.

В представленной работе, синтезированные данным методом образцы гексаферритов, в которых ионы железа частично замещены ионами Сr3+, Mn3+ Ga3+ (с общими формулами соединений SrFe12-хСrxO19, SrFe12-хMnxO19, SrFe12-хGaxO19) и образцы гексаферритов, полученных при одновременном частичном замещении Sr на Ca и железа на Al3+ (с общей формулой Sr0.66Ca0.33Fe12-*х*Al*x*O19), были исследованы с помощью метода резонансной рентгеновской дифракции для прецизионного установления распределений легирующих ионов по позициям атомов железа. Изюминка данного метода заключается в том, что он позволяет надежно разрешить заселенности позиций атомами даже близких по факторам рассеяния. Для этого, помимо нейтральной длины волны, рентгеновские дифрактограммы были получены на длинах волн, соответствующих K-краям поглощения железа и соответствующих легирующих элементов.

Согласно уточнению кристаллической структуры по методу Ритвельда была получена следующая картина распределения ионов заместителей. Для соединений состава Sr0.66Ca0.33Fe6Al6O19 ионы алюминия преимущественно заполняют октаэдрические позиции 2а и 12k. Для соединений с общей формулой SrFe6M6O19 (M = Ga, Cr, Mn) было установлено, что в случае легирования ионами галлия замещение железа происходит преимущественно в октаэдрических позициях 2а и 12k и в тетраэдрической позиции 4f1. При легировании ионами хрома заместители преимущественно заполняют октаэдрические позиции 2а и 12k. В случае легирования ионами марганца ионы железа замещаются преимущественно в октаэдрических позициях 2а и 12k и в тетраэдрической позицию 4f1 (Табл. 1).

***Табл. 1****. Процент замещения ионов железа в различных кристаллических позициях для степени замещения ионов железа х = 6.*

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Заместитель | Доля замещения в различных позициях % | | | | |
| 2a | 2b | 4f1 | 4f2 | 12k |
| Al3+ | 90% | 21% | 23% | 26% | 65% |
| Ga3+ | 70% | 42% | 64% | 25% | 52% |
| Cr3+ | 80% | 9% | 8% | 56% | 64% |
| Mn3+ | 59% | 35% | 66% | 18% | 54% |

Установление особенностей кристаллической структуры является важным этапом получения данных необходимых для моделирования магнитных свойств материалов. Теоретическое обоснование магнитных свойств существенно расширяет понимание природы магнетизма материалов и открывает путь к новым подходы улучшения их магнитных свойств.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Немецкого научно-исследовательского сообщества в рамках научного проекта №21-53-12002.