

Магнитотвердые ферриты: от основ к приложениям

Аспирант 2 г/о Горбачев Евгений Андреевич

Научные руководители: к.х.н., доцент Трусов Лев Артемович,
д.х.н., профессор Казин Павел Евгеньевич

Рецензент: д.х.н., в.н.с. Шляхтин Олег Александрович

Магнитотвердые ферриты – материалы на основе оксидов железа с коэрцитивной силой, условно, более 1000 Э (в 2 тысячи раз больше поля Земли). Благодаря своим востребованным магнитным характеристикам, химической и термической стабильности, а также низкой себестоимости они находят широкое применение от материалов для постоянных магнитов, до сред для магнитной записи и высокочастотных устройств.

Однако многие современные применения этих материалов ограничены из-за их скромных магнитных свойств по сравнению с редкоземельными магнитами (Sm-Co, Nd-Fe-B) и Fe-Pt, в первую очередь намагниченности насыщения (M_s) и коэрцитивной силы (H_c). В то время как намагниченность насыщения принципиально ограничена магнитными структурами ферритов и не может быть увеличена значительно, улучшение коэрцитивной силы теоритически возможно, но это также является большой проблемой, поскольку ферриты проявляют умеренную магнитокристаллическую анизотропию по сравнению с магнитными соединениями на основе редкоземельных элементов. На сегодняшний день существуют три феррита, магнитотвердых при комнатной температуре: феррит кобальта (CoFe_2O_4), гексагональные ферриты со структурой М-типа ($\text{MFe}_{12}\text{O}_{19}$, $M = \text{Pb}, \text{Ba}, \text{Sr}$) и эpsilon оксид железа ($\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$). Последний до недавнего времени являлся единственным ферритом, проявляющим, так называемую, «гигантскую» коэрцитивную силу (более 20 кЭ) [1]. Наряду с высокой коэрцитивной силой соединения $\epsilon\text{-Fe}_{2-x}\text{M}_x\text{O}_3$ ($M = \text{Ga}, \text{Al}, \text{Rh}$) демонстрируют поглощение миллиметровых волн на частотах 35–222 ГГц за счет естественного ферромагнитного резонанса (ЕФМР), что делает данный материал интересным для беспроводных технологий нового поколения (5G, 6G, нового поколения Wi-Fi) [2]. Однако материалы на основе $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ до сих пор не получили широкого применения из-за их сложной технологии синтеза. Нашим коллективом было предложено более элегантное решение проблемы создания магнитотвердых ферритов на основе гексаферритов стронция, легированных алюминием и кальцием [3]. Были достигнуты рекордные для магнитных оксидов значения коэрцитивной силы (до 40 кЭ) и частоты ЕФМР (до 250 ГГц) при комнатной температуре [4].

В данном докладе мы рассмотрим фундаментальные причины магнитотвердых свойств ферритов, обсудим основные методы их синтеза, а также поговорим о том, как с помощью варьирования химического состава и морфологии ферритов можно управлять их магнитными свойствами. Также будет дано представление о современных научных направлениях в данной области, текущих и ожидаемых приложениях магнитотвердых ферритов.

[1] J. Jin, S. Ohkoshi, et al, *Advanced. Materials* (2004), <https://doi.org/10.1002/adma.200305297>.

[2] A. Namai, S. Ohkoshi, et al, *Nature Communications* (2012), <https://doi.org/10.1038/ncomms2038>.

[3] L.A. Trusov, E.A. Gorbachev, et al, *Chemical Communications* (2018), <https://doi.org/10.1039/C7CC08675J>.

[4] E.A. Gorbachev, L.A. Trusov, et al, *Materials Today* (2019), <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2019.05.020>.