

## Магнитокристаллическая анизотропия гексаферритов системы $\text{Ba}_2\text{Ni}_{2-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_{12}\text{O}_{22}^*$

В.А. Журавлев<sup>1</sup>, Р.Ш. Сайдкулов<sup>1</sup>, О.А. Доценко<sup>1</sup>, Д.В. Вагнер<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

Представлены результаты исследования ферромагнитного резонанса на сферических образцах поликристаллических оксидных гексагональных ферримагнетиков Y-типа составов  $\text{Ba}_2\text{Ni}_{2-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_{12}\text{O}_{22}$  с концентрацией  $0.0 \leq x \leq 2.0$  в диапазоне частот 37–50 ГГц. Гексаферриты синтезированы стандартным керамическим методом. Из опытов по ферромагнитному резонансу (ФМР) определены поля магнитокристаллической анизотропии и величины магнитомеханических отношений как целевой Y-фазы, так и примесных фаз. Полученные по данным ФМР оценки фазового состава синтезированных материалов сравниваются с результатами рентгенофазового анализа.

**Ключевые слова:** гексагональный ферримагнетик, ферромагнитный резонанс, магнитокристаллическая анизотропия, магнитомеханическое отношение.

### Введение

Оксидные ферримагнетики с гексагональной кристаллической структурой (гексаферриты) находят широкое применение в различных отраслях современной науки и техники. О неослабевающем интересе ученых и инженеров к этим материалам свидетельствует значительный рост числа публикаций, посвященных исследованиям физических свойств и различным аспектам применения гексаферритов, отмеченный в обзорных работах [1–4].

В отличие от ферритов со структурой шпинели или граната, гексаферриты обладают большими значениями полей магнитокристаллической анизотропии (МКА), а также сравнительно высокими величинами намагниченности насыщения ( $M_s$ ) и температуры Кюри [5]. По типу МКА гексаферриты подразделяются на две группы.

К первой группе относятся магнитожесткие материалы (ферроксдюры) с положительной константой МКА, большими величинами полей МКА ( $H_a$ ) и магнитным упорядочением типа ось легкого намагничивания (ОЛН), которая направлена вдоль гексагональной оси *c* кристалла. Они используются для изготовления постоянных магнитов, в качестве носителей магнитной записи, а также в различных устройствах микроволнового и миллиметрового диапазонов длин волн. К ним относятся простейшие гексаферриты M-типа со структурой магнетоплюмбита:  $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$  ( $0.0 \leq x \leq 1.0$ ). Методы получения, магнитные свойства и области применения этих материалов подробно рассмотрены в работах [1, 5] и в специализированных обзорах [6, 7].

Вторая группа – это магнитомягкие материалы (феррокспланы) с отрицательной константой анизотропии и магнитным упорядочением типа плоскость легкого намагничивания (ПЛН). Шесть направлений легкого и промежуточного намагничивания данной группы материалов расположены в базисной плоскости кристалла, перпендикулярной гексагональной оси *c*. К этой группе материалов относятся гексаферриты более сложных структурных типов: Y, W, Z, X, U. Методики синтеза, кристаллографическая структура и магнитные свойства феррокспланов описаны также в работах [1, 5] и в специализированном обзоре [8]. Характерной особенностью феррокспланов, содержащих в своей структуре ионы  $\text{Co}^{2+}$ , является наличие последовательности спин-ориентационных фазовых переходов (СОФП) при уменьшении температуры от точки Кюри [5]. Вблизи температуры Кюри они имеют магнитное упорядочение типа ОЛН. При понижении температуры происходит переход к магнитному упорядочению типа ПЛН через промежуточную фазу типа конус легкого намагничивания (КЛН). Дальнейшее охлаждение приводит к СОФП от ПЛН к КЛН. В кобальтсодержащих гексаферритах W- и Z-типов температуры этих переходов подробно исследованы в работах [9, 10]. Как правило, поле анизотропии в базисной плоскости ( $H_\Phi$ ) феррокспланов существенно меньше (приблизительно на два порядка), чем поле анизотропии относительно гексагональной оси ( $H_\Theta$ ) [5]. Поэтому эти материалы имеют более высокие значения магнитной проницаемости в микроволновом диапазоне, чем материалы с ОЛН [5]. Их применяют при изготовлении под-

\* Результаты получены в рамках выполнения госзадания Минобрнауки России, проект № FSWM-2025-0014.