

05,04

## Кристаллическая структура, магнитные и микроволновые свойства твердых растворов $\text{BaFe}_{12-x}\text{Ga}_x\text{O}_{19}$ ( $0.1 \leq x \leq 1.2$ )

© А.В. Труханов<sup>1,2</sup>, С.В. Труханов<sup>2</sup>, В.А. Турченко<sup>3</sup>, В.В. Олейник<sup>4</sup>, Е.С. Яковенко<sup>4</sup>, Л.Ю. Мацуй<sup>4</sup>, Л.Л. Вовченко<sup>4</sup>, В.Л. Лаунец<sup>4</sup>, И.С. Казакевич<sup>2</sup>, С.Г. Джабаров<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский технологический университет МИСиС, Москва, Россия

<sup>2</sup> НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, Минск, Беларусь

<sup>3</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

<sup>4</sup> Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко, Киев, Украина

<sup>5</sup> Институт физики им. Г.М. Абдуллаева НАН Азербайджана, Баку, Азербайджан

E-mail: truhanov86@mail.ru

(Поступила в Редакцию 1 марта 2016 г.)

Методом дифракции рентгеновского излучения исследована кристаллическая структура твердых растворов гексагонального феррита бария  $M$ -типа с изоструктурным диамагнитным замещением ионами  $\text{Ga}^{3+}$  —  $\text{BaFe}_{1-x}\text{Ga}_x\text{O}_{19}$  ( $x = 0.1-1.2$ ). Рассчитаны параметры элементарной ячейки для всех составов. Методом вибрационной магнитометрии измерены полевые и температурные зависимости удельной намагниченности данных твердых растворов. Исследованы микроволновые свойства  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Ga}_x\text{O}_{19}$  ( $x = 0.1-1.2$ ) в подмагничивающем поле. Показано, что с ростом концентрации Ga от  $x = 0.1$  до  $x = 0.6$  значение частоты естественного ферромагнитного резонанса уменьшается, а при дальнейшем увеличении концентрации Ga до  $x = 1.2$  вновь растет. С увеличением концентрации Ga линии естественного ферромагнитного резонанса уширяются, что указывает на увеличение частотного диапазона, где происходит интенсивное поглощение электромагнитного излучения. При этом амплитуда пика резонансной кривой изменяется незначительно. Значение сдвига частоты естественного ферромагнитного резонанса во внешнем магнитном поле увеличивается с уменьшением концентрации ионов галлия в образце.

Работа выполнена при софинансировании Министерства образования и науки РФ по программе повышения конкурентоспособности НИТУ „МИСиС“ среди ведущих мировых научно-образовательных центров (№ К4-2015-040), и при поддержке грантов БРФФИ (№ Ф15Д-003) и ОИЯИ (№ 04-4-1121-2015.2017).

### 1. Введение

Интерес к исследованию бариевых ферритов  $M$ -типа с гексагональной структурой ( $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ ) и твердых растворов на их основе, допированных различными концентрациями диамагнитных ионов (Al, Sc и др.) [1–4], обусловлен их высокими функциональными свойствами: превосходная химическая стабильность и коррозионная стойкость [5] делает их экологически безопасными и годными к применению практически без ограничений во времени; сочетание высокой коэрцитивной силы ( $H_c \approx 160-55 \text{ kA/m}$ ) [6–8] с достаточно высокой остаточной индукцией позволяет получать постоянные магниты с удовлетворительной удельной магнитной энергией; их низкая электропроводность ( $\rho \sim 10^8 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$ ) позволяет применять гексаферритовые магниты при наличии высокочастотных магнитных полей. Впервые бариевый гексаферрит, изоморфный магнетоплюмбиту  $\text{PbO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ , был получен в фирме Philips [9] еще в 1950-х годах.

До недавнего времени гексаферрит бария широко использовался только в постоянных магнитах [10] и

в магнитных носителях записи информации высокой плотности с перпендикулярным намагничиванием [11]. Кроме того, в последнее время отмечен серьезный рост публикаций в области исследования таких материалов, как мультиферроики — материалы, сочетающие в себе наличие остаточной намагниченности и спонтанной электрической поляризации [12,13]. Однако, с точки зрения практического применения, гексаферрит бария  $M$ -типа сейчас получает свое новое, третье по счету, рождение как перспективный материал для поглощения электромагнитного излучения (ЭМИ) в микроволновом диапазоне. Известны работы по эффективному поглощению ЭМИ данным материалом в дециметровой и сантиметровой области спектра [14,15], что обеспечивает электромагнитную совместимость устройств микроэлектроники и радиоаппаратуры. К несомненным преимуществам бариевых гексаферритов относятся большая кристаллическая и магнитная анизотропия, а также высокие значения температуры фазового перехода ферромагнетик–парамагнетик: вследствие сильного подрешеточного обмена в соединении фор-

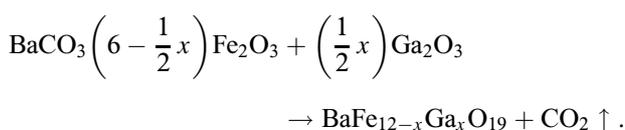
мируется коллинеарное ферромагнитное упорядочение с температурой Кюри  $\sim 740$  К. Изменение числа магнитных связей ионов железа в многокомпонентных оксидных системах (за счет введения диамагнитных ионов-заместителей [16,17] или создания отклонения от стехиометрии по кислороду [18]) позволяет управлять функциональными свойствами данных ферритов.

Анализ свойств ферритов в СВЧ-диапазоне показывает, что рабочий диапазон (диапазон эффективного поглощения) для гексагональных ферритов со структурой типа магнетоплюмбита лежит в сантиметровой области [19]. Применение гексагональных ферритов с высокой степенью кристаллической и магнитной анизотропии в качестве наполнителей композиционных материалов позволяет осуществлять частотно-селективное поглощение электромагнитного излучения путем управления как частотой резонанса доменных границ, так и частотой естественного ферромагнитного резонанса (ЕФМР) ферритов. Известно, что пик поглощения гексагонального феррита бария  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  лежит в области  $\sim 47\text{--}50$  GHz, тогда как замещение ионов железа ионами скандия (до  $x = 1.3$ ) снижает максимум поглощения до 8 GHz. Считается, что потери на высоких частотах обусловлены явлением ЕФМР. Контролируя уровень ионов-заместителей, можно управляемо смещать пик максимума поглощения гексагонального феррита. А получение непрерывного ряда твердых растворов с одинаковым ионом-заместителем позволит расширить полосу поглощения в СВЧ-диапазоне.

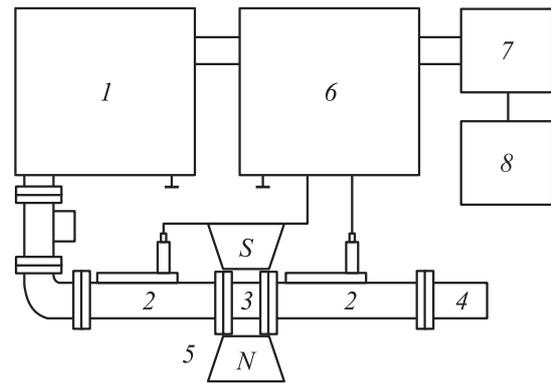
Настоящая статья посвящена решению актуальных задач, стоящих перед разработчиками микроэлектронной и радиоэлектронной аппаратуры — обеспечению внутрисистемной и межсистемной электромагнитной совместимости, а также высоких показателей эксплуатационной надежности приборов и аппаратуры в условиях повышенного уровня СВЧ-воздействий за счет селективного поглощения ЭМИ в заданном диапазоне частот.

## 2. Методика эксперимента

Поликристаллические образцы  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Ga}_x\text{O}_{19}$  ( $x$  принимает значения 0.1, 0.3, 0.6, 0.9, 1.2) были получены из оксидов  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  и карбоната  $\text{BaCO}_3$  квалификации „ОСЧ“, взятых в соответствующих пропорциях



Исходные составы подвергались синтезирующему обжигу на воздухе при  $1200^\circ\text{C}$  (в течение 6 h), а затем спекались при  $1300^\circ\text{C}$  (также в течение 6 h). После спекания образцы медленно охлаждались (со скоростью  $\sim 100^\circ\text{C/h}$ ).



**Рис. 1.** Блок-схема установки для измерения микроволновых свойств образцов: 1 — генератор качающей частоты; 2 — направленные ответвители падающей и отраженной волн соответственно; 3 — волновод с образцом; 4 — согласованная нагрузка; 5 — магнит; 6 — индикатор; 7 — АЦП; 8 — ЭВМ.

Исследование кристаллической структуры образцов было проведено на программно-аппаратном комплексе ДРОН-3М в  $\text{CuK}_\alpha$ -излучении. Напряжение на рентгеновской медной трубке составляло 40 kV, ток — 40 mA. Обработка рентгеновских дифракционных данных осуществлялась с помощью программы FullProf.

Исследования удельной намагниченности были выполнены с помощью универсальной криогенной высокополевой измерительной системы (Liquid Helium Free High Field Measurement System by Cryogenic Ltd, London, UK) при температуре 300 K в полях до 2 T (полевые зависимости) [20] и в поле 0.86 T в диапазоне температур 300–750 K (температурные зависимости). Магнитные измерения проводились на поликристаллических образцах со средним размером  $2 \times 3 \times 5$  mm. Спонтанную намагниченность определяли по полевой зависимости линейной экстраполяцией к нулевому полю. Температуру магнитного фазового перехода „ферромагнетик–парамагнетик“ (температура Кюри) определяли как точку перегиба на температурной зависимости удельной намагниченности.

На рис. 1 представлены блок-схемы измерительной установки для исследования микроволновых свойств образцов в СВЧ-диапазоне.

Измерения микроволновых или поглощающих свойств феррита проводились в диапазоне 36–56 GHz. Образцы помещались в металлический волновод сечением  $5.2 \times 2.6$  mm. Измерения проводились при помощи скалярного анализатора цепей P2–68. Внешнее магнитное поле прикладывалось параллельно вектору электрического поля волны в волноводе.

## 3. Результаты и обсуждение

3.1. Кристаллическая структура. Спектры рентгеновской дифракции  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Ga}_x\text{O}_{19}$  ( $x$  принимает

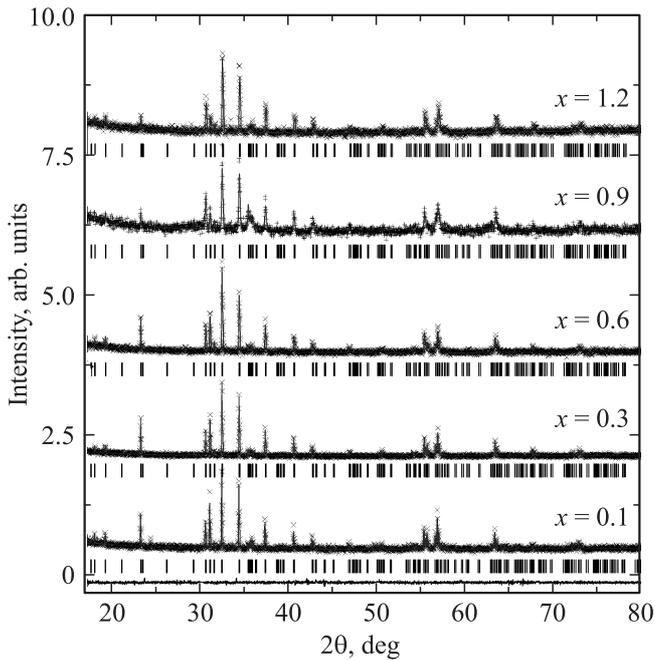


Рис. 2. Спектры рентгеновской дифракции твердых растворов  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Ga}_x\text{O}_{19}$  ( $x$  принимает значения 0.1, 0.3, 0.6, 0.9, 1.2).

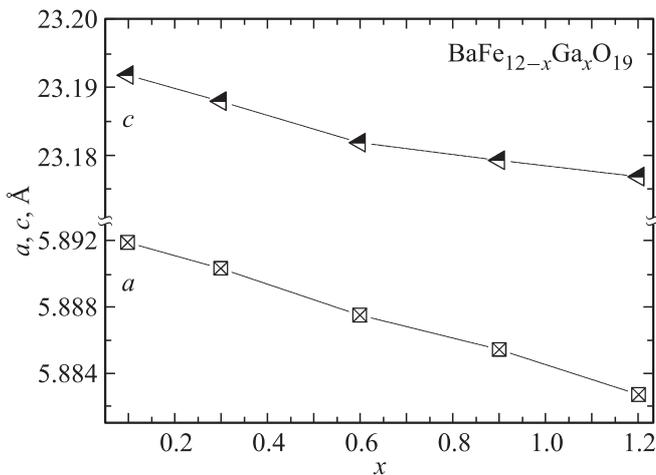


Рис. 3. Концентрационная зависимость параметров элементарной ячейки ( $a, c$ ) твердых растворов  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Ga}_x\text{O}_{19}$  ( $x$  принимает значения 0.1, 0.3, 0.6, 0.9, 1.2).

ет значения 0.1, 0.3, 0.6, 0.9 и 1.2), полученные для различных концентраций Ga при комнатной температуре, представлены на рис. 2. Дифракционные спектры соответствуют однофазным образцам с гексагональной кристаллической структурой с пространственным типом симметрии  $P6_3/mmc$ , что хорошо согласуется с результатами, полученными ранее на твердых растворах, содержащих ионы  $\text{Al}^{3+}$  [1].

Параметры элементарной ячейки ( $a$  и  $c$ ) уменьшаются линейно и незначительно. На рис. 3 представлены результаты расчетов концентрационной зависимости па-

раметров элементарной ячейки для твердых растворов  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Ga}_x\text{O}_{19}$  ( $x = 0.1, 0.3, 0.6, 0.9, 1.2$ ). Незначительное уменьшение параметров элементарной ячейки и, как следствие, объема ячейки обусловлено незначительным расхождением значений ионов  $\text{Ga}^{3+}$  (0.62 Å) и  $\text{Fe}^{3+}$  (0.64 Å). Изотропное и практически линейное уменьшение параметров ячейки обусловлено статистическим распределением диамагнитных ионов-заместителей по анионным позициям (октаэдрическое, тетраэдрическое и бипирамидальное анионные окружения) из-за близости ионных радиусов железа и галлия.

3.2. Магнитные свойства. Модель магнитной структуры бариевых гексаферритов, предложенная Гортером, предполагает, что магнитоактивные ионы  $\text{Fe}^{3+}$  расположены в позициях, которые имеют октаэдрическое ( $\text{Fe1} - 2a$ ,  $\text{Fe4} - 4f_{VI}$  и  $\text{Fe5} - 12k$ ), тетраэдрическое ( $\text{Fe3} - 4f_{IV}$ ) и бипирамидальное ( $\text{Fe2} - 2b$ ) кислородное окружение. Замещение ионов железа диамагнитными ионами, в зависимости от занимаемых ими позиций, может приводить к некоторому различию величин магнитных моментов разных позиций. Кроме того, магнитные моменты названных выше позиций изначально имеют несколько отличные друг от друга значения.

В соответствии с температурной зависимостью удельной намагниченности поликристаллических образцов  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Ga}_x\text{O}_{19}$ , приведенной на рис. 4, фазовый переход ферромагнетик–парамагнетик является фазовым переходом второго рода. Температура фазового перехода при увеличении концентрации ионов  $\text{Ga}^{3+}$  уменьшается плавно от 660 К (для  $x = 0.1$ ) до 575 К (для  $x = 1.2$ ), что значительно ниже, чем у незамещенного аналога  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  — 740 К. Это подтверждает, что замещение ионов железа диамагнитными ионами галлия приводит к уменьшению количества магнитных соседей у ионов железа, и, как следствие, к более раннему разрушению дальнего магнитного порядка при нагревании образцов.

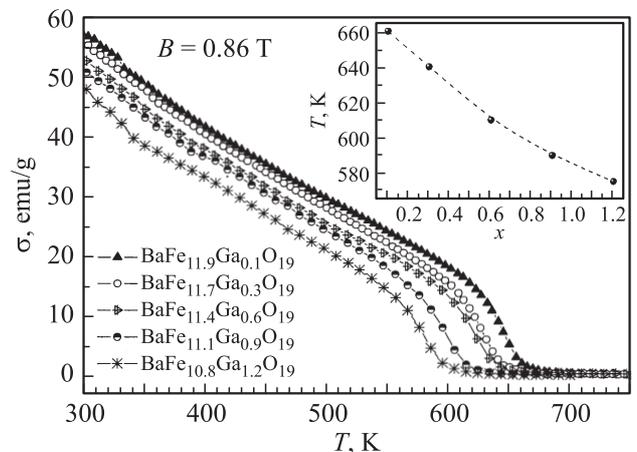
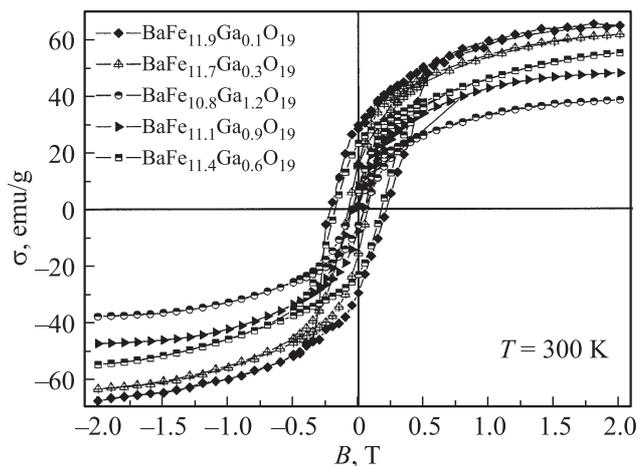


Рис. 4. Температурные зависимости удельной намагниченности твердых растворов  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Ga}_x\text{O}_{19}$  ( $x$  принимает значения 0.1, 0.3, 0.6, 0.9, 1.2) при  $B = 0.86$  Т (на вставке показана концентрационная зависимость температуры Кюри).



**Рис. 5.** Полевые зависимости удельной намагниченности твердых растворов  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Ga}_x\text{O}_{19}$  ( $x$  принимает значения 0,1, 0,3, 0,6, 0,9, 1,2) при  $T = 300$  К.

При диамагнитном замещении происходит фрустрация магнитной подсистемы твердого раствора за счет изменения длин связей между магнитоактивными ионами железа и кислорода с частичным искажением валентного угла, что в совокупности может снижать энергию обменного взаимодействия. Поведение намагниченности образцов на графике полевых зависимостей (рис. 5) указывает на снижение полной магнитной энергии при увеличении концентрации ионов галлия (при увеличении концентрации отмечено снижение остаточной намагниченности и коэрцитивной силы).

Отсутствие аномалий (отклонения снижения магнитной энергии с увеличением концентрации ионов-заместителей от линейной зависимости) на температурах и полевых зависимостях удельной намагниченности свидетельствует в пользу версии о статистическом равномерном распределении ионов галлия по подрешеткам в структуре гексагонального феррита бария  $M$ -типа.

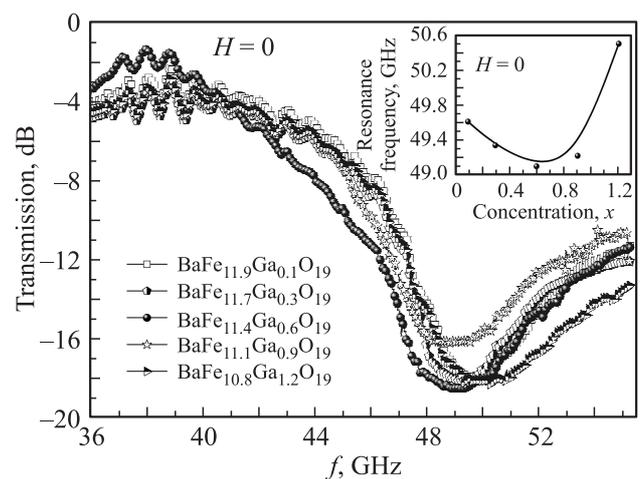
**3.3. Микроволновые свойства.** На рис. 6 представлены спектры прохождения ЭМИ через образцы с разной концентрацией галлия. Наблюдается интенсивное поглощение электромагнитной волны, обусловленное явлением ЕФМР. На вставке на рис. 6 показано, что увеличение концентрации галлия в составе порошка гексаферрита бария вначале уменьшает значение частоты ЕФМР до концентрации  $x = 0,6$ , а затем частота растет и при  $x = 1,2$  принимает максимальное значение  $f = 50,5$  GHz. Амплитуды резонансных кривых изменяются незначительно (рис. 6).

На рис. 7 представлено изменение амплитуды ЕФМР в зависимости от величины концентрации галлия.

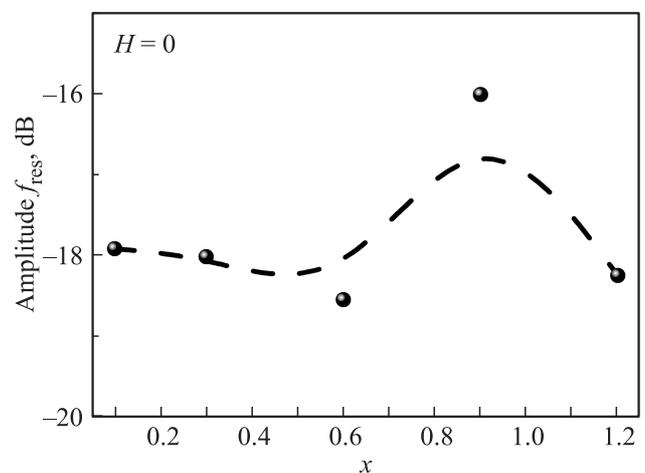
Последующие измерения проводились при наложении внешнего магнитного поля. На рис. 8 представлены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) образцов  $\text{BaFe}_{11,9}\text{Ga}_{0,1}\text{O}_{19}$  и  $\text{BaFe}_{10,8}\text{Ga}_{1,2}\text{O}_{19}$  при разных значениях внешнего магнитного поля.

При небольших значениях магнитного поля происходит смещение резонансной частоты в сторону больших частот (за счет роста эффективного внутреннего магнитного поля анизотропии). При этом амплитуда кривой изменяется мало. Однако при намагничивании образца  $\text{BaFe}_{10,8}\text{Ga}_{1,2}\text{O}_{19}$ , где концентрация галлия наибольшая, вместе с ростом частоты ЕФМР растет и амплитуда резонансной кривой (рис. 8,  $b$ ). Рост амплитуды происходит до значения поля 1,5 kOe, а затем амплитуда начинает уменьшаться, что соответствует поведению мнимой части магнитной проницаемости феррита в магнитном поле при ФМР. На рис. 9 представлена зависимость потерь на отражение в децибелах, для образца  $\text{BaFe}_{10,8}\text{Ga}_{1,2}\text{O}_{19}$  от частоты при различных значениях внешнего магнитного поля, измеренная в режиме согласованной нагрузки.

Зависимость имеет сложный для объяснения характер. Можно констатировать, что при увеличении магнитного поля растут потери и при значении поля 5 kOe

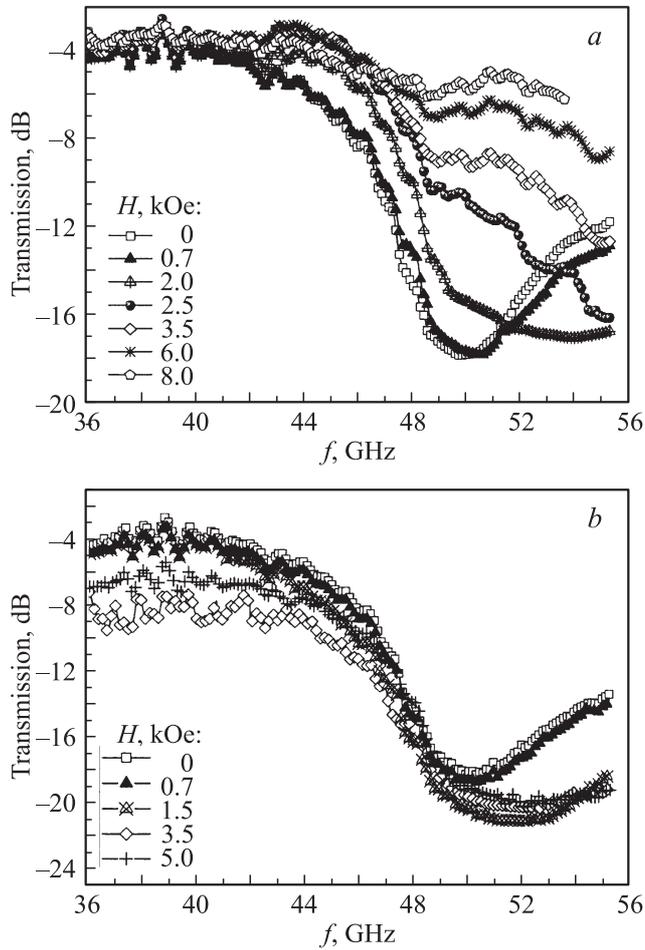


**Рис. 6.** Частотные зависимости коэффициента прохождения твердых растворов  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Ga}_x\text{O}_{19}$  ( $x$  принимает значения 0,1, 0,3, 0,6, 0,9, 1,2) (на вставке — концентрационная зависимость резонансной частоты ЕФМР образцов).

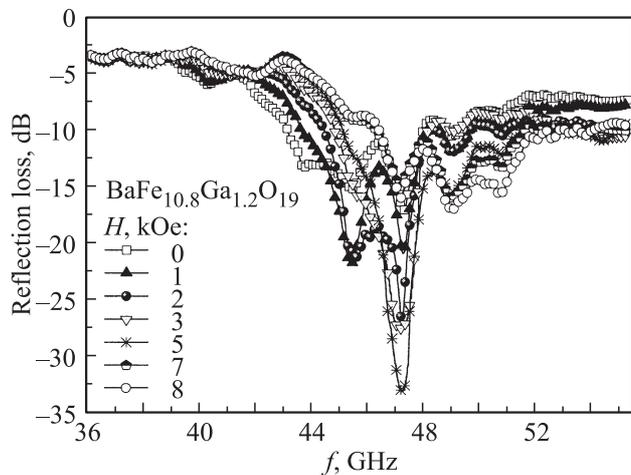


**Рис. 7.** Концентрационная зависимость амплитуды ЕФМР.

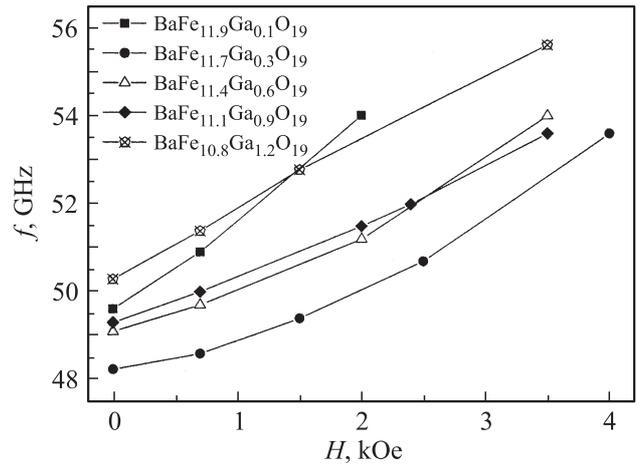
достигается anomальное значение максимума  $\sim -33$  dB. Дальнейшее увеличение магнитного поля приводит к спаду интенсивности резонансной кривой. При этом частота резонансной кривой потерь на отражение почти не изменяется.



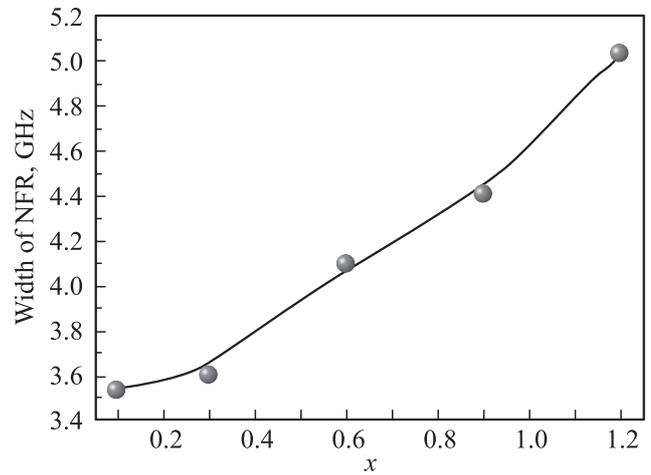
**Рис. 8.** АЧХ (коэффициент прохождения) твердых растворов  $\text{BaFe}_{11.9}\text{Ga}_{0.1}\text{O}_{19}$  (a) и  $\text{BaFe}_{10.8}\text{Ga}_{1.2}\text{O}_{19}$  (b) во внешних магнитных полях.



**Рис. 9.** Частотные зависимости потерь на отражении образца  $\text{BaFe}_{10.8}\text{Ga}_{1.2}\text{O}_{19}$  при различных значениях магнитного поля.



**Рис. 10.** Зависимость значения частоты ЕФМР образцов  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Ga}_x\text{O}_{19}$  ( $x$  принимает значения 0.1, 0.3, 0.6, 0.9, 1.2) от величины магнитного поля.



**Рис. 11.** Концентрационная зависимость ширины линии ЕФМР образцов  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Ga}_x\text{O}_{19}$ , измеренная на полувысоте пика.

На рис. 10 представлены зависимости значения частоты ЕФМР измеряемых образцов от величины внешнего магнитного поля. Наблюдается рост значения резонансной частоты с увеличением магнитного поля, так как растет внутреннее магнитное поле, связанное с анизотропией. Эти зависимости носят почти линейный характер для всех образцов.

На рис. 11 представлена концентрационная зависимость ширины резонансной линии ЕФМР на полувысоте пика.

#### 4. Заключение

Проведены исследования кристаллической структуры твердых растворов керамических образцов  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Ga}_x\text{O}_{19}$  ( $x$  принимает значения 0.1, 0.3, 0.6,

0,9, 1,2) методами рентгеновской дифракции с использованием линии излучения  $\text{CuK}\alpha$ . Все исследуемые составы являются однофазными и характеризуются гексагональной кристаллической структурой с пространственной группой симметрии  $P6_3/mmc$ . Изотропное и практически линейное уменьшение параметров элементарной ячейки обусловлено статистическим распределением диамагнитных ионов-заместителей по анионным позициям (октаэдрическое, тетраэдрическое и бипирамидальное анионные окружения) из-за близости ионных радиусов железа ( $0,64 \text{ \AA}$ ) и галлия ( $0,62 \text{ \AA}$ ).

Магнитный фазовый переход „ферритмагнетик–парамагнетик“ в образцах  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Ga}_x\text{O}_{19}$  ( $x$  принимает значения 0,1, 0,3, 0,6, 0,9, 1,2) является фазовым переходом второго рода. Температура фазового перехода при увеличении концентрации ионов  $\text{Ga}^{3+}$  уменьшается плавно от 660 К (для  $x = 0,1$ ) до 575 К (при  $x = 1,2$ ), что обусловлено снижением количества связей магнитоактивных ионов железа с анионами кислорода. Поведение намагниченности образцов указывает на снижение полной магнитной энергии при увеличении концентрации ионов галлия. Отсутствие аномалий на температурных и полевых зависимостях удельной намагниченности свидетельствует в пользу гипотезы о статистическом равномерном распределении ионов галлия по подрешеткам в структуре гексагонального феррита бария  $M$ -типа.

Проведенные исследования поглощающих свойств твердых растворов показали заметное влияние ионов-заместителей на микроволновые характеристики твердых растворов гексагональных ферритов бария. При малых концентрациях ионов  $\text{Ga}^{3+}$  (до  $x = 0,6$ ) частота ЕФМР образцов падает с 49,6 до 49,2 GHz, а при увеличении концентрации галлия от  $x = 0,6$  до  $x = 1,2$ , увеличивается до 50,6 GHz. Интенсивность резонансных кривых при этом изменяется незначительно. Наложение внешнего магнитного поля значительно сдвигает резонансную частоту образцов при малых концентрациях ионов  $\text{Ga}^{3+}$  и в меньшей мере — при больших концентрациях.

Замещение ионов железа ионами галлия увеличивает частотный диапазон, где происходит интенсивное поглощение электромагнитной энергии, что может быть использовано для улучшения параметров микроволнового излучения.

## Список литературы

- [1] А.В. Труханов, В.А. Турченко, И.А. Бобриков, С.В. Труханов, А.М. Балагуров. Кристаллография **60**, 693 (2015).
- [2] S.H. Jabarov, A.V. Trukhanov, S.V. Trukhanov, A.I. Mammadov, V.A. Turchenko, R.Z. Mehdiyeva, R.E. Huseynov. Optoelectron. Adv. Mater. — Rapid Commun. **9**, 468 (2015).
- [3] Y. Tokunaga, Y. Kaneko, D. Okuyama, S. Ishiwata, T. Arima, S. Wakimoto, K. Kakurai, Y. Taguchi, Y. Tokura. Phys. Rev. Lett. **105**, 257 201 (2010).
- [4] A. Trukhanov, L. Panina, S. Trukhanov, V. Turchenko, M. Salem. Chin. Phys. B **25**, 016 102 (2016).
- [5] X. Liu, J. Wang, L.M. Gan, S.C. Ng, J. Ding. J. Magn. Magn. Mater. **184**, 344 (1998).
- [6] Д.В. Гуденаф. Магнетизм и химическая связь. Металлургия, М. (1968). 328 с.
- [7] S. Castro, M. Gayoso, J. Rivas, J.M. Greneche, J. Mira, C. Rodríguez. J. Magn. Magn. Mater. **152**, 61 (1996).
- [8] M.H. Makled, T. Matsui, H. Tsuda, H. Mabuchi, M.K. El-Mansy, K. Morii. J. Mater. Proc. Tech. **160**, 229 (2005).
- [9] J.J. Went. Philips Tech. Rev. **13**, 194 (1952).
- [10] E. Richter, T.J.E. Miller, T.W. Neumann, T.L. Hudson. IEEE Trans. Industry Appl. **21**, 644 (1985).
- [11] Q.A. Pankhurst, R.S. Pollard. J. Phys.: Condens. Mater. **5**, 5457 (1993).
- [12] С.В. Труханов, А.В. Труханов, Л.В. Панина, И.С. Казакевич, В.О. Турченко, В.В. Кочервинский. Письма в ЖЭТФ **103**, 106 (2016).
- [13] А.В. Труханов, В.О. Турченко, И.А. Бобриков, С.В. Труханов, А.И. Балагуров, И.С. Казакевич. J. Magn. Magn. Mater. **393**, 253 (2015).
- [14] S.B. Narang, I.S. Hudiara. J. Ceram. Proc. Res. **7**, 113 (2006).
- [15] A. Kumar, V. Agarwala, D. Singh. Progr. Electromagn. Res. **29**, 223 (2013).
- [16] V.N. Dhage, M.L. Mane, A.P. Keche, C.T. Birajdar, K.M. Jadhav. Physica B: Condens. Matter **406**, 789 (2011).
- [17] D. Chen, Y. Liu, Y. Li, K. Yang, H. Zhang. J. Magn. Magn. Mater. **337**, 65 ((2013).
- [18] С.В. Труханов, А.В. Труханов, А.Н. Васильев, Г. Шимиак. ЖЭТФ, **138**, 2, 236 (2010).
- [19] В.В. Винников. Основы проектирования РЭС. Электромагнитная совместимость и конструирование экранов. СЗТУ, СПб (2006). 164 с.
- [20] С.В. Труханов, А.В. Труханов, А.Н. Васильев, А.М. Балагуров, Н. Szymczak. ЖЭТФ **140**, 942 (2011).