ЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ СЛОИ И МНОГОСЛОЙНЫЕ КОМПОЗИЦИИ

EPITAXIAL LAYERS AND MULTILAYERED COMPOSITIONS

Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2018. Т. 21, № 2. С.103—111. DOI: 10.17073/1609-3577-2018-2-103-111

УДК 621.318.1:548.73

Измерение поля эффективной магнитной анизотропии и ширины линии ферромагнитного резонанса на частоте ФМР в магнитноодноосных гексагональных ферритах

© 2018 г. А. С. Семенов¹, С. В. Щербаков¹, А. Г. Налогин¹, А. В. Мясников¹, И. М. Исаев², В. Г. Костишин^{2,§}, Н. Е. Адиатулина¹, А. А. Алексеев^{1,2}, Е. А. Белоконь^{1,2}, М. П. Мезенцева²

> ¹АО «НПП «Исток им. Шокина», Вокзальная ул., д. 2a, Фрязино, Московская область, 141190, Россия

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Ленинский просп., д. 4, Москва, 119049, Россия

Аннотация. Рассмотрены вопросы метрологии и определения магнитных величин. Представлены разработанные методики измерения поля эффективной магнитной анизотропии *H*_{Аэфф} и ширины линии ферромагнитного резонанса *ΔH* магнитноодноосных гексагональных ферритов в рабочем диапазоне частот CBЧ–диапазона электромагнитных волн. Методики позволяют определить *H*_{Аэфф} в диапазонах 10—23 и 28—40 кЭ и *ΔH* в диапазоне 0,5—5,0 кЭ. Первая методика (методика измерения в свободном пространстве в трехмиллиметровом диапазоне длин волн) реализована в диапазоне частот 78,33—118,1 ГГц. Вторая методика (методика с использованием микрополосковой линии передачи) — в диапазоне частот от 25 до 67 ГГц. Апробация методик на поликристаллических образцах гексагональных ферритов бария и стронция (как номинального состава, так и сложнозамещенных) с высокой степенью магнитной текстуры, а также сравнение результатов измерений с результатами, полученными с применением общепринятых методик измерений на сферических образцах, показали высокую точность и надежность разработанных методик.

Ключевые слова: магнитная кристаллографическая анизотропия, ферромагнитный резонанс, магнитоодноосные гексагональные ферриты, методика измерения в свободном пространстве, методика с использованием микрополосковой линии передачи

Введение

На сегодняшний день СВЧ-электроника является одним из основных векторов развития всей электронной отрасли [1—3]: от технологий производства материалов [4, 5], приборных структур, электронных компонентов, устройств электроники до радиоэлектронной аппаратуры, систем и комплексов на их основе [6].

К категории наиболее перспективных материалов СВЧ-электроники следует отнести гексагональные ферриты в виде монокристаллов и текстурированных поликристаллов [7—9]. Эти материалы относятся к так называемым магитноодноосным и

§ Автор для переписки

Семенов Алексей Сергеевич¹ — начальник сектора 92; Налогин Алексей Григорьевич¹ — канд. техн. наук, начальник НПК-9, e-mail: alexeinalogin@gmail.com; Щербаков Сергей Владиленович¹ — канд. техн. наук, зам. генерального директора – директор по научной работе; Мясников Александр Васильевич¹ — ведущий инженер-конструктор; Исаев Игорь Магомедович² — канд. техн. наук, проректор по безопасности и общим вопросам; Костишин Владимир Григорьевич^{2,§} — доктор физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой ТМЭ, e-mail: drvgkostishyn@mail.ru; Адиатулина Наталья Евгеньевна¹ — инженер; Алексеев Альберт Александрович^{1,2} — начальник сектора 91, e-mail: alekseevalbert@bk.ru; Белоконь Евгений Анатольевич^{1,2} — инженер второй категории, e-mail: amon.moment@gmail.com; Мезенцева Марина Петровна² — аспирант кафедры ТМЭ e-mail: mezenceva.marina@ mail.ru

обладают высокими значениями полей магнитной анизотропии [7—9]. Применение этих материалов в ферритовых СВЧ-приборах резонансного типа позволяет уменьшить напряженность внешнего поля и, следовательно, габариты и вес магнитной системы [9].

Потребность электроники в качественных магнитоодноосных СВЧ-гексаферритах стимулирует исследования по доработке существующих и разработке новых технологий получения этих материалов и изучению их свойств [10—16].

Одними из основных параметров ферромагнитного резонанса (ФМР) в поликристаллических магнитноодноосных гексагональных ферритах (МОГФ) являются поле эффективной анизотропии $(H_{\rm A_{\rm 2dbb}})$ и ширина лини
и $\Phi {\rm MP}$ ($\Delta H)$ [9]. Обе эти характеристики материала определяют «положение на шкале магнитного поля» самого резонансного спектра и ширину линий резонансного поглощения. Проведение характеризации образцов МОГФ требует наличия качественных методик определения $H_{\mathrm{A}_{\mathrm{3}\mathrm{d}\mathrm{d}\mathrm{d}}}$ и
 $\Delta H.$ При этом $H_{\mathrm{A}_{\mathrm{3}\mathrm{d}\mathrm{d}\mathrm{d}}}$ необходимо определять не из результатов статистических измерений, а, как и ширину линий ФМР, из результатов измерений непосредственно в рабочем диапазоне частот применения гексаферритов. А это, в основном, --- коротковолновая часть сантиметрового диапазона длин волн и миллиметровый диапазон длин волн.

Общие вопросы методики измерения свойств материалов в СВЧ-диапазоне электромагнитных волн изложены в работах [17—19]. Классические методики измерения $H_{A_{3\phi\phi}}$ и ΔH на сфере представлены в работе [20]. Сегодня определение электромагнитных параметров ферритов в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн проводят преимущественно с помощью уникальной измерительной аппаратуры, при этом сами методики измерения — весьма трудоемки.

Ниже рассмотрены методики, позволяющие проводить измерение $H_{A_{3}\phi\phi}$ и ΔH поликристаллических МОГФ со следующими значениями:

— эффективное поле анизотропи
и $(H_{\rm A_{3} \dot{\phi} \dot{\phi}})$ — 10—23 и 28—40 кЭ;

– ширина линии ФМР (∆H) — 0,5—5 кЭ.

Измерени
е $H_{\rm A_{3} \phi \phi}$ и ΔH в предложенных методиках проводили на частот
е ФМР.

Измерение эффективного поля магнитной анизотропии и ширины линии ФМР в свободном пространстве

Измерение $H_{A_{3\phi\phi}}$ и ΔH в свободном пространстве в 3-миллиметровом диапазоне длин волн. Метод основан на зависимости резонансной частоты $f_p \Phi MP$ гексаферритов от значения их эффективного поля анизотропии $H_{A_{3\phi\phi}}$. Суть этого метода частично представлена в работах [21, 22]. Для измерения $H_{A_{9}\varphi\varphi}$ и ΔH поликристаллических МОГФ со значениями $H_{A_{9}\varphi\varphi} = 28$ —40 кЭ применяли методику с использованием размагниченных плоскопараллельных пластин из заготовок МОГФ с осью текстуры, перпендикулярной к их плоскостям, основанную на рассмотрении прохождения через них при нормальном падении квазиплоской электромагнитной волны в свободном пространстве.

При этом для согласования волнового сопротивления гексаферритовых пластин ($\epsilon_{\rm d}$ = 13÷18) с волновым сопротивлением свободного пространства используют расположенные с двух сторон гексаферритовых пластин плоскопараллельные кварцевые пластины ($\epsilon_{\rm kB}$ = 3,8÷3,9) толщиной $\lambda_{\rm kB}/4$, где $\lambda_{\rm kB}$ — длина волны в кварцевой пластине на частоте измерения. Исследуемый образец с кварцевыми пластинами при измерении помещается между волноводно-рупорными переходами, один из которых создает квазиплоскую электромагнитную волну, другой возбуждается прошедшей через образец квазиплоской электромагнитной волной.

Волноводно-рупорные переходы должны иметь линейные размеры апертуры рупора не менее $3\lambda_0$, где λ_0 — длина волны в свободном пространстве на частоте измерения, и быть согласованы со свободным пространством и источником электромагнитной энергии (значение коэффициента стоячей волны по напряжению (**КСВН**), входа волноводно-рупорных составляет не более 1,1).

Так как исследуемый образец размагничен, он не может возбуждать переизлученную (вторичную) волну, поэтому затухание волны при прохождении через образец определяется только поглощением электромагнитной энергии при естественном ФМР. На этом основано определение $H_{\rm A_{эф}\phi}$ по значению резонансной частоты $f_{\rm p}$ естественного ФМР,



Рис. 1. Модель размагниченной пластины из гексаферрита Fig. 1. Model of demagnetized hexagonal ferrite plate

которая соответствует минимальному значению коэффициента прохождения при изменении частоты электромагнитной волны.

В определении $H_{A_{2}\phi\phi}$ учтено (полуэмпирически) влияние на f_p переменных размагничивающих полей, связанных со скачками переменной намагниченности на границе слоев зерен (рис. 1).

На основании изложенного выше, $H_{\rm A_{3}\varphi\varphi}$ определяется по формуле

$$H_{\rm A_{\rm sphp}} = \frac{f_p}{\gamma} - \frac{2}{3} 4\pi M_{\rm s}, \qquad (1)$$

где γ — гиромагнитное отношение; $4\pi M_{\rm s}$ — намагниченность насыщения (значение намагниченности насыщения измеряется другими методами измерения).

Ширина линии ΔH ферромагнитного резонанса и значение $f_{\rm p}$ определяются по частотной зависимости коэффициента прохождения из выражений:

$$\Delta H = \frac{f_2 - f_1}{\gamma}, \qquad (2)$$

$$f_p = \frac{f_1 - f_2}{2}, \qquad (3)$$

где f_1, f_2 — значения частот на резонансной линии магнитного резонанса по уровню измерения, соответствующему половинному значению поглощенной мощности.

Апробирование данной методики проводили в 3-миллиметровом диапазоне длин волн с использованием панорамного измерителя КСВН и ослабления Рем2.648.020 (разработка АО «НПП «Исток» им. Шокина»). Результаты измерений на пластинах



- Рис. 2. Общий вид панорамного измерителя КСВН и ослабления P2–124M
- Fig. 2. General appearance of P2–124M panoramic voltage standing wave ratio and attenuation meter



из поликристаллического гексаферрита с $H_{A_{3}\phi\phi}$ = 28+35 кЭ в свободном пространстве сравнивали с результатами измерений $H_{A_{3}\phi\phi}$ и ΔH на намагниченных сферических образцах, помещенных в волноводный тракт панорамного измерителя КСВН и ослабления. Сферические образцы изготавливали из тех же гексаферритовых заготовок, что и пластины. Расхождение результатов измерения $H_{A_{3}\phi\phi}$ и ΔH находилось в пределах относительной инструментальной ошибки (не более ±4 %).

Экспериментальная установка для измерения $H_{A_{3\phi\phi}}$ и ΔH в свободном пространстве в 3-миллиметровом диапазоне длин волн. На основе волноводного панорамного измерителя КСВН и ослабления P2–124M 3-миллиметрового диапазона длин волн (рабочий диапазон частот 78,33—118,1 ГГц) была разработана экспериментальная установка для измерения $H_{A_{3\phi\phi}}$ и ΔH в свободном пространстве.

Установка состоит из волноводного панорамного измерителя КСВН и ослабления P2–124M, а также разработанного измерительного модуля, установленного в измерительный тракт.

Общий вид панорамного измерителя КСВН и ослабления P2–124M приведен на рис. 2, а структурная схема — на рис. 3.

Измерительный модуль состоит из платформы и двух волноводно-рупорных переходов (сечение волновода $1,2 \times 2,4$ мм², апертура рупоров 10×10 или 14×14 мм²) со значением КСВН на входе не более 1,1 в рабочем диапазоне частот измерителя P2–124M.

Схема измерительного модуля с измеряемым образцом и согласующими кварцевыми пластинами, установленными между волноводно-рупорными переходами, приведена на рис. 4.

Экспериментальная установка имеет следующие характеристики:

- рабочий диапазон частот 78,33—118,1 ГГц;



Рис. 4. Схема измерительного модуля: 1 — платформа; 2 — измерительные рупоры; 3 — подвижная пластина; 4 — регулировочный винт; 5 — образец; 6 — согласующие кварцевые пластины; 7 — элементы крепления и стыковки

Fig. 4. Schematic of measuring module: (1) platform,
(2) measuring horns, (3) mobile plate, (4) adjustment screw,
(5) specimen, (6) matching quartz plates and (7) connection hardware

интервалы измеряемых величин: эффективное поле анизотропии 28—40 кЭ; ширина линии магнитного резонанса 0,3—5,0 кЭ;

– форма измеряемых образцов: плоскопараллельная прямоугольная (или круглая) пластина с поперечными размерами не менее 20 × 20 мм² (диаметром не менее 20 мм), толщиной 0,2—1,0 мм;

– размеры кварцевых согласующих пластин: поперечные размеры > 20×20 мм²; толщина $\lambda_{\rm кв}/4$ ($\lambda_{\rm кв}$ — длина волны в кварце на частоте измерения);

– погрешность измерения с доверительной вероятностью 0,95 в интервале: относительная погрешность измерения эффективного поля анизотропии $\delta H_{\rm Aэф\phi}$ составляет не более ±5%; относительная погрешность измерения ширины линии ФМР $\delta(\Delta H)$ не более ±20%;

условия эксплуатации: температура окружающего воздуха (+10 ÷ +35) °С; относительная влажность воздуха при температуре 25 °С — 80 %; атмосферное давление 86÷106 кПа.

Измерение намагниченности насыщения (один из методов) проводят на гистерезисграфе автоматическом AMT-4 фирмы «Mianyang Shuangji Electronic Co. Ltd.» (относительная погрешность измерения намагниченности насыщения ±1%).

Измерение эффективного поля анизотропии и ширины линии магнитного резонанса в магнитно-одноосных гексагональных ферритах в диапазоне частот от 25 до 67 ГГц с использованием микрополосковой линии передачи

Изучали возможность измерения эффективного поля анизотропии и ширины линии ФМР, основанную на анализе взаимодействия образца гексаферрита малых размеров с электромагнитным полем в микрополосковой линии передачи (МПЛ), и зависимости резонансной частоты магнитного резонанса в образцах гексаферритов от $H_{\rm A_{3}ф\phi}$ с использованием современных широкодиапазонных панорамных анализаторов цепей.

Измерения в широком диапазоне частот проводили с использованием в качестве измерителя СВЧ-параметров МПЛ с исследуемым образцом гексаферрита векторного анализатора цепей Agilent N5227A с коаксиальными входами сечением 1,85/0,8 мм (диапазон рабочих частот 10 МГц — 67 Ггц). Использованная МПЛ была выполнена на подложке из поликора ($\varepsilon \approx 9,6$) с волновым сопротивлением ≈ 50 Ом (толщина подложки 0,25 мм). Размеры подложки МПЛ выбраны таким образом, чтобы на частотах до 67 ГГц в МПЛ не возбуждались высшие типы волн. Подключение отрезка МПЛ к векторному анализатору цепей осуществляли с помощью коаксиально-микрополоскового измерительного модуля фирмы Anritsu (модель 3680V). Измерительный модуль представляет из себя платформу с двумя коаксиально-микрополосковыми переходами (сечение коаксиалов 1,85/0,8 мм). Длина МПЛ ($l \simeq 30$ мм) была выбрана из расчета такой, чтобы расположить, по возможности, подальше друг от друга места подключения МПЛ к коаксиальным линиям с целью уменьшения прямого прохождения сигнала (вне МПЛ).

Исследуемые образцы поликристаллических МОГФ представляли плоские правильные призмы с квадратным основанием с линейными размерами не более $0,5 \times 0,5$ мм², толщиной 0,15-0,25 мм, с осью текстуры, перпендикулярной к основанию призмы. Эти размеры образцов позволили исключить влияние диэлектрического резонанса в исследованных образцах гексаферрита ($\epsilon_{\phi} \approx 13 \pm 18$) на форму линии ФМР в диапазоне частот 25—67 ГГц и обеспечить возбуждение исследуемого образца относительно однородным внешним электромагнитным полем, создаваемым МПЛ.



Рис. 5. Измерительный модуль с отрезком МПЛ и исследуемым образцом поликристаллического МОГФ

Fig. 5. The measuring module with the MTL segment and the studied sample of polycrystalline MUHF



Рис. 6. Установка для измерения параметров поликристаллических МОГ в диапазоне частот 25—67 ГГц с использованием МПЛ

Fig. 6. Installation for measuring the parameters of

polycrystalline MUH in the frequency range 25–67 GHz using MTL

Внешний вид измерительного модуля с установленным в нем отрезком МПЛ с исследуемым образцом гексаферрита изображен на рис. 5.

Разработанная экспериментальная установка для измерения параметров МОГФ (*ΔH*, *H*_{Aэфф}) с использованием МПЛ изображена на рис. 6.

Измерительная установка состоит из векторного анализатора цепей Agilent N5227A (диапазон рабочих частот от 10 МГц до 67 ГГц), измерительного коаксиально-микрополоскового измерительного модуля фирмы Anritsu (модель 3680V) и отрезка МПЛ, установленного в измерительный модуль.

Измерения проводят в следующем порядке.

1. МПЛ, изготовленную на подложке из поликора, устанавливают в измерительный модуль, подключенный к анализатору цепей и проводят нормализацию (выравнивание) по коэффициенту передачи.

2. Исследуемый образец в виде призмы размером не боле
е $0,5\times0,5\times(0,15-0,25)$ мм³ помещают на МПЛ.

3. Проводят измерение значений частот на резонансной линии магнитного резонанса по уровню измерения, соответствующему половинному значению поглощенной мощности (f_1 и f_2).

4. Рассчитывают резонансную частоту $f_{\rm p}$, эффективное поле анизотропии $H_{\rm A_{3}\phi\phi}$ и ширину линии магнитного резонанса ΔH по формулам (3), (1) и (2) соответственно. При оценке влияния размагничивающих факторов на резонансную частоту ФМР призму заменяли сплющенным вписанным эллипсоидом вращения.

Если образец намагничен и измерения проводят с внешним магнитным полем, то уравнение для $\Delta H_{\rm A_{20}db}$ будет иметь вид

$$H_{A_{2\phi\phi}} = \frac{f_p}{\gamma} + \frac{1}{2} (3N - 1) 4\pi M_0 - H_0, \qquad (4)$$

где γ — гиромагнитное отношение; $4\pi M_0$ — текущее значение намагниченности насыщения исследуемого образца; H_0 — напряженность внешнего магнитного поля; N — размагничивающий фактор по оси, перпендикулярной основанию призмы (для сплющенного эллипсоида вращения N =

$$=rac{1}{1-\vartheta^2}\left(1-rac{\vartheta}{\sqrt{1-\vartheta^2}}rccosartheta
ight)$$
, где $artheta$ — отношение вы-

соты эллипсоида к диаметру.

Если образец намагничен, измерения проводят без внешнего магнитного поля:

$$H_{A_{\Im \oplus \oplus}} = \frac{f_p}{\gamma} + \frac{1}{2} (3N - 1) 4\pi M_0, \qquad (5)$$

где $4\pi M_{\rm s}$ — намагниченность насыщения исследуемого образца; $4\pi M_{\rm r}$ — остаточная намагниченность исследуемого образца.

В случае, когда образец размагничен, то:

$$H_{\rm A_{\rm opp}} = \frac{f_p}{\gamma} + \zeta 4\pi M_{\rm s}, \qquad (6)$$

где ζ — коэффициент, определяется доменной структурой в исследуемом размагниченном образце.

При расчете по формулам (4) и (5) приблизительно можно считать $M_0 = M_r$. Как видно из выражений (4), (5) и (6), для более точного определения значения $H_{\rm Aэф\varphi}$ в зависимости от режима измерения необходимо знать значения величин $4\pi M_0$, $4\pi M_r$, H_0 , N, ζ , которые определяются другими измерениями. В противном случае погрешность измерения $H_{\rm Aэ\varphi\varphi}$ увеличивается на величину порядка $\pm 4\pi M_s$.

При определении $H_{A_{2}\varphi\varphi}$ по формуле (6) в случае размагниченного образца значение коэффициента ζ принимали равным $\zeta = -2/3$ на основании результатов работы.

Экспериментальная установка имеет следующие характеристики:

- рабочий диапазон частот 20—67 ГГц;

интервалы измеряемых величин: эффективное поле анизотропии 10—23 кЭ, ширина линии ФМР 0,1—5 кЭ;

— форма измеряемых образцов: плоская правильная призма с квадратным основанием с линейными размерами не более 0.5×0.5 мм², толщиной 0.15-0.25 мм, с осью текстуры перпендикулярной к основанию призмы;

– погрешность измерения с доверительной вероятностью 0,95 в интервале: относительная погрешность измерения $H_{A ext{-}3 ext{cd}} - \delta H_{A ext{-}3 ext{cd}}$ не более $\pm 5 \%$, относительная погрешность измерения $\Delta H - \delta(\Delta H)$ не более $\pm 20 \%$;

— условие эксплуатации: температура окружающего воздуха 10—35 °C, относительная влажность воздуха при температуре 25 °C — 80 %, атмосферное давление 86—106 кПа.

Измерение намагниченности насыщения (один из методов) проводится на гистерезисграфе автоматическом AMT-4 фирмы Mianyang Shuangji Electronic Co. Ltd. (относительная погрешность измерения намагниченности насыщения ±1 %).

Апробация предложенных методик измерения

Апробация методики по измерению в свободном пространстве. На рис. 7 представлен экспериментальный спектр ФМР в размагниченной плоскопараллельной пластине бариевого магнитоодноосного гексаферрита в диапазоне частот 78,33—118,1 ГГц, полученный методом измерения в свободном пространстве на экспериментальной установке, описанной выше.

Таблица 1

Результаты измерения в свободном пространстве в миллиметровом диапазоне длин волн характеристик ФМР размагниченных пластин МОГФ [Results of FMR parameter measurements for demagnetized MUHF plates in free space in millimeter wave range]

Параметр	Образец	
	ГБ-13	ГБ-14
f_1 , ГГц	88,8	102,8
$f_2,$ ГГц	97,2	107,5
$f_{ m p}$, ГГц	92,9	105,15
$4\pi M_{ m s},\Gamma{ m c}$	1800	1400
<i>Н</i> _{Аэфф} , кЭ	32,0	36,5
Δ <i>H</i> , кЭ	3,0	1,68



Рис. 7. Интерфейс с характерным спектром ФМР в пластине поликристаллического магнитноодноосного гексагонального феррита BaFe₁₂O₁₉ (измерение в свободном пространстве; образец ГБ–13)

Fig. 7. Interface with typical FMR spectrum in a plate of polycrystalline magnetically uniaxial hexagonal BaFe₁₂O₁₉ ferrite (measured in free space, specimen HB–13)



Рис. 8. Характерные спектры ФМР в пластине поликристаллического магнитноодноосного гексагонального феррита, измеренные методом МПЛ: *a* — BaFe₁₂O₁₉ (образец ГБ–2–5); *б* — Sr(Fe,Al,Si,Ca)₁₂O₁₉ (образец ГС–8–1)

Fig. 8. Typical FMR spectra in a plate of polycrystalline magnetically uniaxial hexagonal ferrite measured with the MTL method: (a) BaFe₁₂O₁₉ (specimen HB–2–5) and (*δ*) Sr(Fe,AI,Si,Ca)₁₂O₁₉ (specimen HS–8–1)

Таблица 2

Результаты измерения $H_{A_{3}\phi\phi}$ и ΔH в диапазоне частот 25—67 ГГц в МОГФ с использованием микрополосковой линии передач [Results of H_{Aeff} and ΔH measurement for MUHF in the 25—67 GHz range using a microstrip transmission line]

Параметр	Образец (h = 0,25)	
	ГБ-2-5	ГС-8-1
$f_1, \Gamma \Gamma$ ц	41,18	45,88
$f_2, \Gamma \Gamma$ ц	53,32	56,04
<i>Δf</i> , ГГц	12,14	10,16
$f_{\mathrm{ц}},$ ГГц	47,25	51,00
Н _{Аэфф} , кЭ	17,8	19,22
ΔΗ, кЭ	4,34	3,63
$4\pi M_{ m r}, \Gamma m c$	3200	3500

Диаметр исследованных плоскопараллельных размагниченных пластин из бариевых МОГФ составлял 30 мм, толщина — 0,37 мм. Результаты измерения значений частот (f_1, f_2) и расчета $H_{A_{3}\phi\phi}$ и ΔH по выражениям (1), (2) и (3) приведены в табл. 1.

Апробация методики по измерению в диапазоне частот от 25 до 67 ГГц с использованием микрополосковой линии передачи. Измерения $H_{\rm A_{3}dpd}$ и ΔH с использованием МПЛ проводили на намагниченных до насыщения образцах из поликристаллических бариевых и стронциевых МОГФ с размерами 0,5 × \times 0,5 × 0,25 ($N \simeq 0,53$) по методике, описанной выше.

На рис. 8, *a*, представлен экспериментальный спектр ФМР намагниченного бариевого МОГФ (без внешнего магнитного поля).

На рис. 8, б, представлен экспериментальный спектр ФМР намагниченного стронциевого замещенного МОГФ (без внешнего магнитного поля).

Результаты измерения значений частот (f_1, f_2) и расчета $H_{A_{3}\phi\phi}$ и ΔH по формулам (4), (6) и (8) приведены табл. 2.

Заключение

Представлены разработанные методики измерения поля эффективной магнитной анизотропии $H_{\rm Aэф\phi}$ в диапазонах 10—23 и 28—40 кЭ и ширины линии ферромагнитного резонанса ΔH в диапазоне 0,5—5 кЭ в магнитоодноосных гексагональных ферритах.

Апробация разработанных методик для измерения $H_{A_{3}\phi\phi}$ и ΔH магнитоодноосных поликристаллических гексагональных ферритов бария и стронция типа M (как номинального состава, так и сложно замещенных) показала их высокую точность и надежность. По сравнению с традиционными методиками измерения $H_{A_{3}\phi\phi}$ и ΔH на сферических образцах, разработанные позволяют повысить точность измерений на 10—12 %.

Показано, что разработанные методики позволяют эффективно решать вопросы измерения электромагнитных параметров магнитоодноосных гексагональных ферритов, применяемых в СВЧ– электронике и позволят ускорить реализацию на подложках из этих материалов приборов мм– диапазона длин волн.

Библиографический список

1. Щербаков С. В. Развитие СВЧ–электроники в рамках реализации государственных программ / Электроника и микроэлектроника СВЧ: Сб. статей VI Всеросс. конф. СПб.: Изд–во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. С. 15—23.

2. Щербаков С. В. Развитие СВЧ-электроники в России // Материалы научно-техн. конф. «СВЧ-электроника-2016». Фрязино, 2016.

3. Мальцев П., Шахнович И. СВЧ-технологии — основа электроники будущего. Тенденции и рынки // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2015. № 8. С. 72—84.

4. Викулов И. Радиоэлектронные системы АФАР: направления развития и применения // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2017. № 5. С. 126—134. 5. Устинов А., Кочемасов В., Хасьянова Е. Ферритовые материалы для устройств СВЧ–Электроники. Основные критерии выбора // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2015. № 8. С. 86—92. URL: http://www.electronics.ru/files/article_pdf/4/ article_4907_795.pdf

6. Харинская М. Микроволновые ферритовые материалы. Ну как без них СВЧ-приборам обойтись! // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2000. № 1. С. 24—27. URL: http://www. electronics.ru/files/article pdf/1/article 1518 892.pdf

7. Летюк Л. М., Костишин В. Г., Гончар А. В. Технология ферритовых материалов магнитоэлектроники. М.: МИСиС, 2005. 352 с.

8. Анциферов В. Н., Летюк Л. М., Андреев В. Г., Гончар А. В., Дубров А. Н., Костишин В. Г., Майоров В. Р., Сатин А. И. Проблемы порошкового материаловедения. Ч. V. Технология производства порошковых ферритовых материалов: учебник для студентов вузов. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 408 с.

9. Яковлев Ю. М., Генделев С. Ш. Монокристаллы ферритов в радиоэлектронике. М.: Сов. радио, 1975. 360 с.

10. Kostishyn V. G., Korovushkin V. V., Chitanov D. N., Korolev Yu. M. Obtaining and properties of hexaferrite $BaFe_{12}O_{19}$ for high–coercivity permanent magnets and substrates microstrip microwave devices of mm–range // J. Nano– Electron. Phys. 2015. T. 7, № 4. C. 04057–1—04057–47. URJ: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ jnef 2015 7 4 59

11. Andreev V.G., Kostishyn V.G., Ursulyak N.D., Nalogin A. G., Kudashov A. A. Influence of modes shredding of source components by processes to synthesis and activity of powder sintering hexaferrite // J. Nano- Electron. Phys. 2015. T. 7, № 4. C. 04070. URL: https://jnep.sumdu.edu.ua/download/numbers/2015/4/articles/ jnep_2015_V7_04070.pdf

12. Kostishyn V.G., Panina L. V., Timofeev A. V., Kozhitov L. V., Kovalev A. N., Zyuzin A. K. Dual ferroic properties of hexagonal ferrite ceramics $BaFe_{12}O_{19}$ and $SrFe_{12}O_{19}$ // J. Mag. Mag. Mater. 2016. V. 400. P. 327—332. DOI: 10.1016/j.jmmm.2015.09.011

13. Kostishyn V. G., Panina L. V., Kozhitov L. V., Timo-feev A. V., Kovalev A. N. Synthesis and multiferroic properties of M-type SrFe₁₂O₁₉ hexaferrite ceramics // J. Alloys Compd. 2015. V. 645. P. 297—300. DOI: 10.1016/j.jallcom.2015.05.024

14. Trukhanov A. V., Trukhanov S. V., Kostishyn V. G., Panina L. V., Korovushkin V. V., Turchenko V. A, Vinnik D. A., Yakovenko E. S., Zagorodnii V. V., Launetz V. L., Oliynyk V. V., Zubar T. I., Tishkevich D. I., Trukhanova E. L. Correlation of the atomic structure, magnetic properties and microwave characteristics in substituted hexagonal ferrites // J. Mag. Mag. Mater. 2018. V. 462. P. 127—135. DOI: 10.1016/j.jmmm.2018.05.006

15. Trukhanov A. V., Kostishyn V. G., Panina L. V., Korovushkin V. V., Turchenko V. A., Thakur P., Thakur A., Yang Y., Vinnik D. A., Yakovenko E. S., Matzui L. Yu., Trukhanova E. L., Trukhanov S. V. Control of electromagnetic properties in substituted M-type hexagonal ferrites // J. Alloys Compd. 2018. V. 754. P. 247—256. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.04.150

16. Trukhanov A. V., Panina L. V., Trukhanov S. V., Kostishyn V. G., Turchenko V. A., Vinnik D. A., Zubar T. I., Yakovenko E. S., Macuy L. Yu., Trukhanova E. L. Critical influence of different diamagnetic ions on electromagnetic properties of BaFe₁₂O₁₉ // Ceramics International. 2018. V. 44, Iss. 12. P. 13520—13529. DOI: 10.1016/j.ceramint.2018.04.183

17. Данилин А. А. Измерения в технике СВЧ: учеб. пособие для вузов. М.: Радиотехника, 2008. 184 с.

 Андронов Е. В., Глазов Г. Н. Теоретический аппарат измерений на СВЧ: Т. 1. Методы измерений на СВЧ. Томск: ТМЛ– Пресс, 2010. 804 с.

 Дансмор Дж. П. Измерения параметров СВЧ-устройств с использованием передовых методик векторного анализа цепей.
 М.: Техносфера, 2018. 736 с.

20. Чечерников В. И. Магнитные измерения. М.: МГУ, 1969. 388 с.

21. Метод измерения эффективного поля анизотропии и ширины полосы ферромагнитного резонанса магнитно-одноосных ферритов в рабочем диапазоне температур: Методика измерения (рег. № 012.991–023, 1986 г., АО «НПП «Исток» им. Шокина»).

22. Семенов А. С., Семенов М. Г., Мясников А. В., Налогин А. Г. Метрологическое обеспечение разработок ферритовых материалов для сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн // Электроника и микроэлектроника СВЧ. СПб.:Санкт-Петербургский гос. ун-т «ЛЭТИ», 2017. Т. 1, № 1. С. 27—31.

Работа выполнена в рамках выполнения НИР «Гексаферрит», финансируемой за счет личных средств АО «НПП «Исток им. Шокина», а также при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках соглашения о предоставлении субсидии № 14.575.21.0030 от 27 июня 2014 г. (RFMEFI57514X0030).

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2018 г.

Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = *Materials of Electronics Engineering.* 2018, vol. 21, no. 2, pp. 103—111. DOI: 10.17073/1609-3577-2018-2-103-111

Measurement of the field of effective magnetic anisotropy and linewidth of ferromagnetic resonance at FMR frequency in magnetically-uniaxial hexagonal ferrites

A. S. Semenov¹, A. G. Nalogin¹, S. V. Shcherbakov¹, A. V. Myasnikov¹, I. M. Isaev², V. G. Kostishin^{2,§}, N. E. Adiadulina¹, A. A. Alekseev^{1,2}, E. A. Belokon^{1,2}, M. P. Mezentseva²

¹ JSC «RPC "Istok" named after Shokin», 2A Vokzalnaya Str., Fryazino, Moscow Region 141190, Russia

² National University of Science and Technology MISiS, 4 Leninsky Prospekt, Moscow 119049, Russia

Abstract. The work is purely metrological in nature. The developed methods for measuring the effective magnetic anisotropy field $H_{A_{eff}}$ and the line width of ferromagnetic resonance ΔH of magnetically–axis hexagonal ferrites in the working frequency range of the microwave range of electromagnetic waves are presented. Methods allow to determine $H_{A_{eff}}$ in the ranges of 10–23 kOe and 28–40 kOe and ΔH in the range of 0.5÷5 kOe. The first technique (measurement technique in free space in the three–millimeter wavelength range) is implemented in the frequency range 78.33–118.1 GHz. The second technique (the technique using the microstrip transmission line) is implemented in the frequency range from 25 to 67 GHz.

Testing of the methods on polycrystalline samples of hexagonal barium and strontium ferrites (both nominal composition and complex ones) with a high degree of magnetic texture, comparison of measurement results with results obtained using standard measurement techniques on spherical samples showed their high accuracy and reliability.

Keywords: magnetic crystallographic anisotropy, ferromagnetic resonance (FMR) linewidth, FMR frequency, saturation magnetization, magnetically uniaxial hexagonal ferrites, resonant-type microwave devices, texture axis, millimeter range of electromagnetic waves, free-space measurement method, microstripline technique transmission

References

1. Shcherbakov S. V. The development of microwave electronics in the framework of the implementation of state programs. Materialy VI-i Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Elektronika i mikroelektronika SVCh» = Proceedings of the VIth All-Russian Scientific-Technical Conference «Electronics and Microelectronics of Microwave». St. Petersburg: SPbGETU «LETI», 2017, pp. 15—23. (In Russ.)

2. Shcherbakov S. V. The development of microwave electronics in Russia. Materialy nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «SVChelektronika-2016» = Materials of the scientific and technical conference «Microwave Electronics-2016». Fryazino, 2016. (In Russ.)

3. Maltsev P., Shakhnovich I. Microwave technologies — the basis of future electronics. Trends and markets. *Electronics: Science, Technology, Business*, 2015, no. 8, pp. 72—84. (In Russ.)

4. Vikulov I. Radio–electronic systems with active phased arrays:directions of development and applications. *Electronics: Science, Technology, Business*, 2017, no. 5, pp. 126–134. (In Russ.). DOI: 10.22184/1992–4178.2017.165.5.126.134

5. Ustinov A., Kochemasov V., Khasyanova E. Ferrite materials for microwave electronics. selection prime criterions. *Electronics: Science, Technology, Business,* 2015, no. 8, pp. 86—92. (In Russ.). URL: http://www.electronics.ru/files/article_pdf/4/article 4907 795.pdf

6. Harinskaya M. Microwave ferrite materials. Well how can microwave devices do without them? *Electronics: Science, Technology, Business,* 2000, no. 1, pp. 24—27. (In Russ.). URL: http://www.electronics.ru/files/article_pdf/1/article_1518_892.pdf

7. Letyuk L. M., Kostishin V. G., Gonchar A. V. *Tekhnologiya ferritovykh materialov magnitoelektroniki* [Technology of ferrite materials of magnetoelectronics]. Moscow: MISiS, 2005, 352 p. (In Russ.)

8. Antsiferov V. N., Letyuk L. M., Andreev V. G., Gonchar A. V., Dubrov A. N., Kostishyn V. G., Satin A. I. *Problemy poroshkovogo materialovedeniya*. *Chast' V. Tekhnologiya proizvodstva poroshkovykh ferritovykh materialov* [Problems of powder materials. Pt V. The technology of production of powdered ferrite materials]. Ekaterinburg: Uro RAN, 2005, 408 p. (In Russ.)

9. Yakovlev Yu. M., Gendelev S. Sh. *Monokristally ferritov* v radioelektronike [Single crystals of ferrites in radio electronics]. Moscow: Sovetskoe radio, 1975, 360 p. (In Russ.)

10. Kostishyn V. G., Korovushkin V. V., Chitanov D. N., Korolev Yu. M. Obtaining and properties of hexaferrite $BaFe_{12}O_{19}$ for high–coercivity permanent magnets and substrates microstrip microwave devices of mm–range. *J. Nano–Electron. Phys.*, 2015, vol. 7, no. 4, pp. 04057–1—04057–47. URJ: http://nbuv.gov.ua/UJRN/jnef_2015_7_4_59

11. Andreev V. G., Kostishyn V. G., Ursulyak N. D., Nalogin A. G., Kudashov A. A. Influence of modes shredding of source components by processes to synthesis and activity of powder sintering hexaferrite. J. Nano– Electron. Phys., 2015, vol. 7, no. 4, p. 04070.

Information about authors:

Alexey S. Semenov¹: Head of Sector 92; Aleksey G. Nalogin¹: Cand. Sci. (Eng.), Head of NPC-9 (alexeinalogin@gmail.com); Sergey V. Shcherbakov¹: Cand. Sci. (Eng.), Deputy General Director – Director for Scientific Work; Alexander V. Myasnikov¹: Leading Design Engineer; Igor M. Isaev²: Cand. Sci. (Eng.), Vice–Rector for Security and General Affairs; Vladimir G. Kostishyn^{2,§}: Dr. Sci. (Phys.–Math.), Head of Department of «Technology for Electronic materials» (drvgkostishyn@mail.ru); Natalya E. Adiatulina¹: Engineer; Albert A. Alekseev^{1,2}: Head of Sector 91 (alekseevalbert@bk.ru); Evgeny A. Belokon^{1,2}: Engineer (amon.moment@gmail.com); Marina P. Mezentseva²: Postgraduate Student of Department of TME (mezenceva.marina@mail.ru)

§ Corresponding author

 $\label{eq:URL: https://jnep.sumdu.edu.ua/download/numbers/2015/4/articles/jnep_2015_V7_04070.pdf$

12. Kostishyn V. G., Panina L. V., Timofeev A. V., Kozhitov L. V., Kovalev A. N., Zyuzin A. K. Dual ferroic properties of hexagonal ferrite ceramics BaFe₁₂O₁₉ and SrFe₁₂O₁₉. J. Mag. Mag. Mater., 2016, vol. 400, pp. 327—332. DOI: 10.1016/j.jmmm.2015.09.011

13. Kostishyn V. G., Panina L. V., Kozhitov L. V., Timofeev A. V., Kovalev A. N. Synthesis and multiferroic properties of M–type Sr-Fe₁₂O₁₉ hexaferrite ceramics. *J. Alloys Compd.*, 2015, vol. 645, pp. 297–300. DOI: 10.1016/j.jallcom.2015.05.024

14. Trukhanov A. V., Trukhanov S. V., Kostishyn V. G., Panina L. V., Korovushkin V. V., Turchenko V. A., Vinnik D. A., Yakovenko E. S., Zagorodnii V. V., Launetz V. L., Oliynyk V. V., Zubar T. I., Tishkevich D. I., Trukhanova E. L. Correlation of the atomic structure, magnetic properties and microwave characteristics in substituted hexagonal ferrites. J. Mag. Mag. Mater., 2018, vol. 462, pp. 127—135. DOI: 10.1016/j.jmmm.2018.05.006

15. Trukhanov A. V., Kostishyn V. G., Panina L. V., Korovushkin V. V., Turchenko V. A., Thakur P., Thakur A., Yang Y., Vinnik D. A., Yakovenko E. S., Matzui L. Yu., Trukhanova E. L., Trukhanov S. V. Control of electromagnetic properties in substituted M-type hexagonal ferrites. J. Alloys Compd., 2018, vol. 754, pp. 247—256. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.04.150

16. Trukhanov A. V., Panina L. V., Trukhanov S. V., Kostishyn V. G., Turchenko V. A., Vinnik D. A., Zubar T. I., Yakovenko E. S., Macuy L. Yu., Trukhanova E. L. Critical influence of different diamagnetic ions on electromagnetic properties of BaFe₁₂O₁₉. *Ceramics International*, 2018, vol. 44, no. 12, pp. 13520—13529. DOI: 10.1016/j. ceramint.2018.04.183

17. Danilin A. A. *Izmereniya v tekhnike SVCh* [Measurements in the microwave technology]. Moscow: Radiotekhnika, 2008, 184 p. (In Russ.)

18. Andronov E. V., Glazov G. N. Teoreticheskii apparat izmerenii na SVCh: T. 1. Metody izmerenii na SVCh [Theoretical apparatus for measurements on microwave: Vol. 1. Methods of measurements on microwave]. Tomsk: TML Press, 2010, 804 p. (In Russ.)

19. Dunsmore J. P. *Izmereniya parametrov SVCh–ustroistv* s ispol'zovaniem peredovykh metodik vektornogo analiza tsepei [Handbook of microwave component measurements with advanced VNA techniques]. Moscow: Technosphere, 2018, 736 p. (In Russ.)

20. Chechernikov V. I. *Magnitnye izmereniya* [Magnetic measurements]. Ed. prof. E.I. Kondorsky. Moscow: MGU, 1969, 388 p. (In Russ.)

21. Metod izmereniya effektivnogo polya anizotropii i shiriny polosy ferromagnitnogo rezonansa magnitno-odnoosnykh ferritov v rabochem diapazone temperatur. Metodika izmereniya [A method for measuring the effective anisotropy field and the bandwidth of the ferromagnetic resonance of magnetically uniaxial ferrites in the operating temperature range. The measurement method] (reg. No. 012.991-023, 1986, AO «NPP «Istok» im. Shokina»). (In Russ.)

22. Semenov A. S., Semenov M. G., Myasnikov A. V., Nalogin A. G. Metrological support of the development of ferrite materials for the centimeter and millimeter wavelength ranges. *Elektronika i mikroelektronika SVCh = Electronics and microwave microelectronics*. Sankt–Peterburgskii gosudarstvennyi universitet «LETI», 2017, vol. 1, no. 1, pp. 27—31. (In Russ.)

Acknowledgments. This work was carried out as part of the research work «Hexaferrite», funded by personal funds of JSC «RPC "Istok" named after Shokin», as well as with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation under the agreement on the provision of subsidy No. 14.575.21.0030 dated June 27, 2014 (RFMEFI57514X0030).