

**Н.Ю. Григорьева, Е.Я. Полищук**

ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

## **Исследование собственных мод феррит-сегнетоэлектрических резонаторов с магнитной кристаллографической анизотропией М- и Y-типа**

*Проведено теоретическое исследование зависимости собственных частот феррит-сегнетоэлектрических резонаторов, содержащих слои гексаферритов Y-типа и M-типа, от внешнего магнитного поля. Получены частотно-полевые зависимости для структур типа сегнетоэлектрик-гексаферрит-диэлектрическая подложка в случае, когда ось магнитной кристаллографической анизотропии гексаферрита перпендикулярна плоскости слоев структуры. Проведен анализ влияния электромагнитного запаздывания на характер поведения собственных частот трехслойного феррит-диэлектрического резонатора при изменении величины внешнего магнитного поля. Исследования проведены для двух типов гексаферритов: M-типа и Y-типа, с одноосной магнитной кристаллографической анизотропией типа «легкая ось» и типа «легкая плоскость», соответственно.*

**Ключевые слова:** гексаферрит, мультиферроидная структура, одноосная магнитная кристаллографическая анизотропия, гибридные электромагнитно-спиновые волны

Постоянно растущий интерес к мультиферроидным структурам, содержащим слои сильно анизотропных магнитных материалов, объясняется перспективностью их использования в спин-волновой микро- и наноэлектронике [1-5]. В последние годы потребность в приборах субтерагерцового диапазона частот с двойным (электрическим и магнитным) управлением рабочими характеристиками вызвала дополнительный интерес к данному классу материалов. Современные технологии уже сейчас позволяют получать эпитаксиальные сегнетоэлектрические пленки на поверхности гексагональных ферритов, имеющих сравнительно небольшую ширину линии ферромагнитного резонанса [4,5]. Это открывает новые возможности использования таких структур в интегральных СВЧ устройствах миллиметрового диапазона.

Известно, что сильная магнитная кристаллографическая анизотропия в тонкопленочных феррит-диэлектрических структурах коренным образом меняет спектр спиновых волн. Из-за наличия сильной анизотропии спектр собственных частот не только смещается в субтерагерцовый диапазон частот ~50-100 GHz при сравнительно небольших магнитных полях смещения, но и подвергается значительному влиянию электромагнитных мод, распространяющихся в слоистой диэлектрической структуре. Наличие сильного электромагнитно-спинового взаимодействия приводит к изменению групповой скорости как электромагнитных, так и спиновых волн в областях их фазового синхронизма. В свою очередь, появление гибридных электромагнитно-спиновых волноводных мод приводит к значительной модификации частотно-полевой зависимости резонансных мод резонаторов, построенных на основе таких мультиферроидных структур, и она уже не может быть описана в рамках магнитостатического приближения.

В данной работе теоретически исследованы трехслойные феррит-диэлектрические резонаторы, содержащие слои сильно анизотропных ферромагнетиков с магнитной кристаллографической анизотропией двух типов: типа «легкая ось» и типа «легкая плоскость». Эти два типа анизотропии присущи гексаферритам М- и Y-типа, соответственно. Если на оси одноосной анизотропии гексаферрита достигается максимум энергии, то говорят, что это ось трудного намагничивания (или анизотропия типа «легкая плоскость»). Если же оси симметрии соответствует минимум энергии, то ее называют осью легкого намагничивания (или анизотропией типа «легкая ось»). Для обоих типов гексаферрита (М- и Y-типа) рассмотрен наиболее распространенный случай, когда ось одноосной магнитной кристаллографической анизотропии перпендикулярна плоскости слоев структуры.

В предыдущей работе [6] нами был рассмотрен способ нахождения равновесной ориентации намагниченности и полевые зависимости равновесных углов и внутреннего магнитного поля для пленочных гексаферритов М- и Y-типа, поэтому здесь мы не будем подробно останавливаться на обосновании выбора направлений внешнего магнитного поля для двух типов гексаферрита и нахождении равновесной ориентации намагниченности образца. Отметим только, что расчеты проводятся в предположении, что направление эффективного внутреннего статического магнитного поля всегда совпадает с направлением равновесной намагниченности.

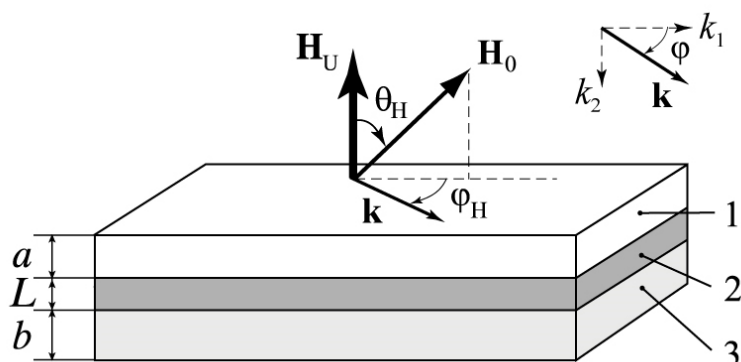


Рисунок 1

В качестве объекта исследований был выбран трехслойный феррит-диэлектрический резонатор с поперечными размерами 1 x 1 мм (рис. 1), состоящий из диэлектрической подложки (3) толщиной  $b = 300$  мкм, пленки гексаферрита (2) толщиной  $L = 5$  мкм и пленки сегнетоэлектрика БСТ (1) толщиной  $a = 20$  мкм. Такая структура характерна для микроэлектронных приборов с двойным (электрическим и магнитным) управлением их рабочими характеристиками. Диэлектрические проницаемости слоев  $\epsilon_b = 10$ ,  $\epsilon_L = 18$ ,  $\epsilon_a = 1200$ , соответственно. В качестве гексаферрита М-типа был выбран ВаМ с намагниченностью насыщения 4800 Гс и полем анизотропии 16800 Э. В качестве гексаферрита Y-типа был выбран  $Zn_2Y$  с намагниченностью насыщения 2500 Гс и полем анизотропии  $-9000$  Э. Внешнее магнитное поле в случае гексаферрита М-типа прикладывалось в плоскости вдоль одного из ребер резонатора  $\theta_H = 90^\circ$ , а в случае гексаферрита Y-типа поле было приложено перпендикулярно плоскости структуры  $\theta_H = 0$ .

Расчет частотно-полевых зависимостей и дисперсионных характеристик проводился на основе численного решения точного дисперсионного уравнения дипольно-обменных электромагнитно-спиновых волн, полученного в работе [7] и обобщенного на случай одноосной магнитной анизотропии слоя феррита. Все расчёты проведены для основной моды электромагнитно-спиновых волн с использованием диагонального приближения, справедливость применения которого предварительно проверялась.

На рис. 2 представлены частотно-полевая зависимость резонансных мод (рис. 2, *a*) и дисперсионные характеристики электромагнитно-спиновых волн (Рис. 2, *b*) для касательно намагниченной структуры, содержащей гексаферрит М-типа. На врезке рис. 2, *a* показана зависимость внутреннего поля от внешнего смещающего магнитного поля. Частотно-полевая зависимость построена в широком диапазоне прикладываемых магнитных полей от 0 до 40 кЭ для трех первых мод резонатора  $k_{11}=44 \text{ см}^{-1}$ ,  $k_{21}=70 \text{ см}^{-1}$ ,  $k_{31}=99 \text{ см}^{-1}$ . Волновые числа рассчитывались обычным способом  $k = \sqrt{k_1^2 + k_2^2}$  (см. рис. 1). Также, при построении частотно-полевой зависимости было учтено, что при касательном намагничивании образца разные моды распространяются под различными углами к внешнему магнитному полю, то есть  $\varphi_H = \arctan(k_2/k_1)$  и для мод с  $k_{11}$ ,  $k_{21}$ ,  $k_{31}$  углы были выбраны  $45^\circ$ ,  $26^\circ$  и  $18^\circ$ , соответственно.

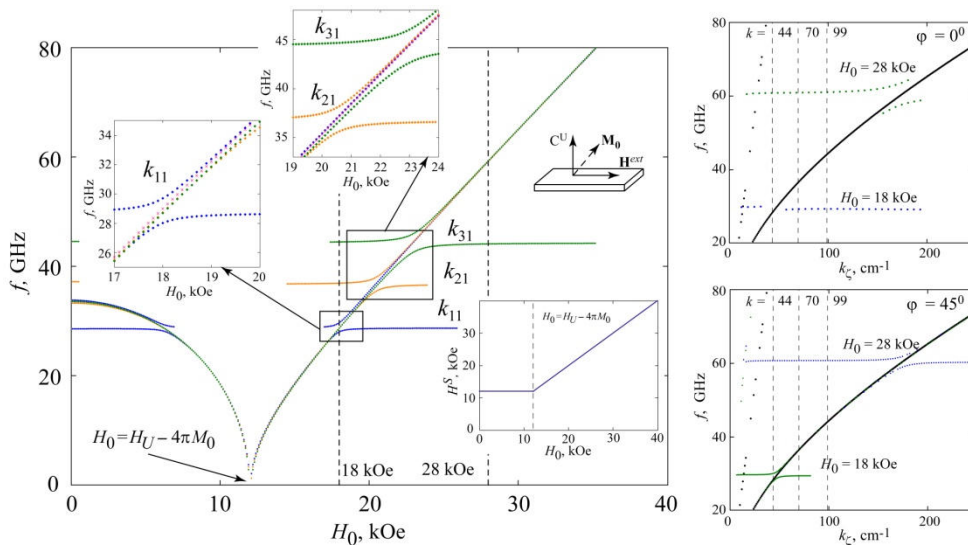


Рисунок 2

Очевидно, что частотно-полевая зависимость, представленная на рис. 2, *a*, особенно сильно отличается от магнитостатического приближения в областях сильного взаимодействия электромагнитных и спиновых волн (см. увеличенную область). Здесь спин-волновые моды, зависящие от внешнего магнитного поля, постепенно переходят в собственные резонансы чисто электромагнитных волн, на которые магнитное поле не оказывает никакого влияния. Как было показано в работе [1] электромагнитно-спиновые резонансы, находящиеся ниже частот ферромагнитного резонанса также могут быть

использованы на практике для создания электронно перестраиваемых резонаторов и вентилях. Общий немонотонный характер частотно-полевой зависимости (рис. 2, *a*) объясняется постепенным поворотом результирующего внутреннего поля от перпендикулярного намагничивания (при малых внешних магнитных полях  $H_0 \leq H^U - 4\pi M_0$ ) к касательному (при  $H_0 > H^U - 4\pi M_0$ ).

На рис. 2, *b* представлены дисперсионные характеристики рассматриваемой мультиферроидной структуры при двух значениях внешнего магнитного поля. Вертикальными пунктирными линиями отмечены первые три моды соответствующего резонатора. Хорошо видно, что первая электромагнитная ТЕ-мода диэлектрической структуры пересекает весь диапазон рассматриваемых частот, а, следовательно, исключение учета электромагнитного запаздывания неприемлемо при расчете характеристик таких резонаторов.

На рис. 3 представлены частотно-полевая зависимость резонансных мод (рис. 3, *a*) и дисперсионные характеристики электромагнитно-спиновых волн (рис. 3, *b*) для перпендикулярно намагниченной структуры, содержащей гексаферрит Y-типа. Данная геометрия задачи некоторым образом дуальна ранее рассмотренному случаю. Здесь гексаферрит изначально имеющий результирующее внутреннее магнитное поле равное нулю и лежащее в плоскости образца, вследствие перпендикулярного намагничивания образца с анизотропией типа «легкая плоскость», при внешних полях выше  $|H^U - 4\pi M_0|$  становится перпендикулярно намагниченным. Как видно из представленных графиков, в этом случае также наблюдается сильное влияние электромагнитных волноводных мод структуры при сравнительно низких внешних магнитных полях.

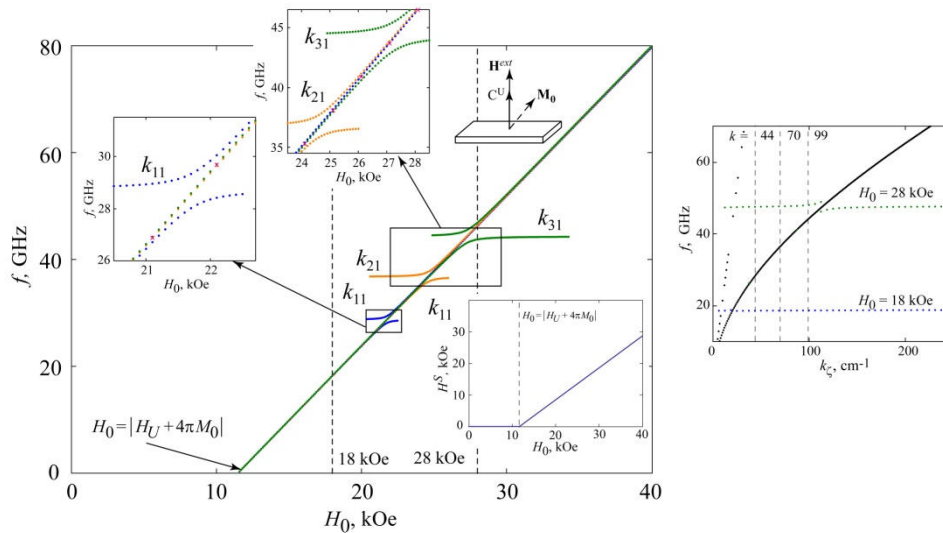


Рисунок 3

Следует отметить, что разработанная нами теория и компьютерная программа позволяют проделывать аналогичные расчеты для любой конфигурации феррит-диэлектрического резонатора и при произвольных ориентациях осей анизотропии и внешнего магнитного поля. Данная демонстрация показывает, что для сложных структур,

содержащих слои с высокой диэлектрической проницаемостью и сильной магнитной кристаллографической анизотропией оценка резонансных мод в рамках магнитостатического приближения неприемлема.

Полученные в данной работе результаты могут быть полезны при расчете мод феррит-сегнетоэлектрических резонаторов в широком диапазоне частот и оценки погрешности магнитостатического приближения при определении собственных состояний в произвольно намагниченных слоистых мультиферроидных структурах, содержащих пленки сильно анизотропных ферромагнетиков с одноосной магнитной кристаллографической анизотропией.

#### Библиографический список

1. Popov M.A. Mode Splitting in 37-42 GHz Barium Hexaferrite Resonator: Theory and Device Applications. / M. A. Popov, I. V. Zavislyak, N. N. Movchan, I. A. Gudim, and G.Srinivasan // IEEE Transactions on Magnetics. – 2014. – Vol. PP. – Issue 99 – article 2298498.
2. Jalli J. Ferrimagnetic  $Sr_{1.5}Ba_{0.5}Zn_2Fe_{12}O_{22}$  (Zn-Y) Single Crystal With Planar Anisotropy. / J. Jalli, Y.-K. Hong, J.-J. Lee, G. S. Abo, T. Mewes, B.-C. Choi, and S.-G. Kim. // IEEE Magnetic Letters. – 2011. – Vol. 2. – article 5000104.
3. Grigoryeva N. Yu. Dual-tunable hybrid wave hexaferrite-ferroelectric millimetre-wave phase shifter / N. Yu. Grigoryeva, R. A. Sultanov, B. A. Kalinikos // – Electronics Letters. – 2011. – Vol. 47. – №1. – pp. 35 - 36.
4. Das J. Electric-field control of ferromagnetic resonance in monolithic  $BaFe_{12}O_{19}Ba_{0.5}Sr_{0.5}TiO_3$  heterostructures / J. Das, Y.-Y. Song, M. Wu // – Journal of applied physics. – 2010. – Vol. 108. – №4. – pp. 1 - 4.
5. Song Y.-Y. Electric Tuning of Ferromagnetic Resonances in Hexagonal-Barium-Ferrite/Barium-Strontium-Titanate Heterostructures / Y.-Y. Song, J. Das, P. Krivosik, H.-K. Seo, and M. Wu // IEEE Magnetic Letters. – 2010. – Vol. 1. – article 2500204.
6. Григорьева Н.Ю. Исследование углового распределения и нахождение минимума полной магнитной энергии анизотропного ферромагнитного образца при произвольной ориентации оси анизотропии и внешнего магнитного поля. / Григорьева Н.Ю., Султанов Р.А., Полищук Е.Я. // – Всероссийская конференция Электроника СВЧ, СПбГЭТУ, Санкт-Петербург, Россия, 3 - 6 Июня 2013.
7. Григорьева Н.Ю. Влияние параметра закрепления поверхностных спинов ферритовой пленки на дисперсионные характеристики слоистых структур феррит-сегнетоэлектрик / Н.Ю. Григорьева, Р.А. Султанов, Б.А. Калиникос // – ФТТ. – 2011. – Т.53. – Вып.5. – С. 971-979.