

УДК 621.317.4; 53.082.72/78

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ
МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ФЕРРОГРАНАТОВОЙ ПЛЕНКИ В КАЧЕСТВЕ
СЕРДЕЧНИКА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ**

Убизский С.Б., Павлык Л.П., Христофору Е.

ВВЕДЕНИЕ

Возможность одновременного измерения трёх компонент магнитного поля, используя особенности магнитной анизотропии монокристаллической пленки феррограната, была предложена впервые Перловым А.Я. и др. [1], основываясь на принципах преобразователя магнитного поля типа феррозонда с магнитным полем возбуждения, вращающимся в плоскости пленки. В качестве активной среды такого преобразователя может использоваться эпитаксиальная пленка феррограната (ЭПФГ) ориентации (111), выращенная методом жидкофазной эпитаксии и обладающая направлением спонтанной намагниченности, близким к плоскости пленки, т.е. умеренной индуцированной в направлении [111] одноосной анизотропией. Амплитуда вращающегося поля возбуждения в таком феррозонде должна быть достаточной для насыщения пленки. Это обеспечивает её перемагничивание как когерентное вращение вектора намагниченности в монокристаллической анизотропной среде и осуществление ферромодуляции, необходимой для функционирования феррозонда [2,3], благодаря магнитной анизотропии среды. Использование в таком преобразователе феррогранатовой пленки показало главное преимущество – намного более низкий уровень собственного шума среды [4], связанный с отсутствием баркгаузеновских скачков намагниченности, что дает возможность измерения сигналов в диапазоне пТл. Недавняя публикация [5] была посвящена, в частности, анализу шумов в феррозонде на основе ЭПФГ с вращающимся полем возбуждения. Несмотря на то, что возможность векторного измерения магнитного поля феррозондом на основе ЭПФГ отмечалась в публикациях несколько раз [1,4-7], анализ такой возможности до сих пор не проводился и условия для ее реализации не определены. Настоящая работа посвящена анализу условий измерения трёх компонент магнитного поля на основе феноменологической модели перемагничивания монокристаллической феррогранатовой пленки, опубликованной ранее в [8].

**ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЕ СЕРДЕЧНИКА ИЗ ЭПФГ ВО ВРАЩАТЕЛЬНОМ
МАГНИТНОМ ПОЛЕ И СПЕКТРАЛЬНЫЙ СОСТАВ СИГНАЛА ОТКЛИКА**

Преобразователь магнитного поля, рассматриваемый в этой работе, состоит (см. Рис. 1) из сердечника в форме диска, которым служит ЭПФГ на немагнитной подложке, системы возбуждения и измерительной катушки (или двух катушек). Вращающееся магнитное поле создается двумя плоскими катушками (см. Рис. 1), оси которых ортогональны и лежат в плоскости пленки, в которых протекают

синусоидальные токи, смещенные по фазе на $\pi/2$.

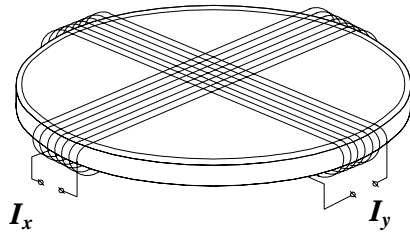


Рис. 1. Схема преобразователя магнитного поля на основе ЭПФГ с катушками возбуждения.

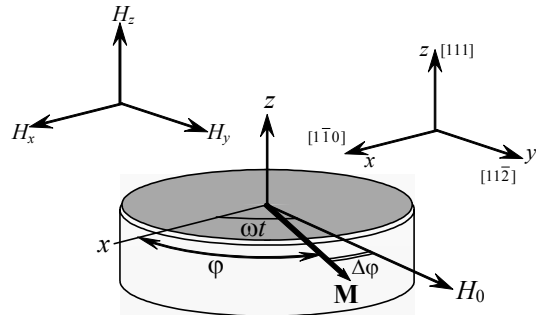


Рис. 2. Расположение кристаллографических осей и магнитных полей при вращательном возбуждении (111) ориентированной ЭПФГ.

Поскольку доменная структура в феррогранатовой пленке в присутствии насыщающего поля возбуждения отсутствует, то динамика перемагничивания не связана с движением доменных границ. В этом случае перемагничивание ЭПФГ во вращающемся магнитном поле можно считать квазистатическим. Поле возбуждения удерживает пленку в энергетически равновесном состоянии, которое определяется минимумом суммы анизотропных составляющих свободной энергии плёнки, а именно – энергии магнитной анизотропии, энергии размагничивающих полей и зеемановской энергии пленки во внешнем магнитном поле. Выражения для плотности энергии магнитной анизотропии для (111)-ориентированной эпитаксиальной феррогранатовой пленки с учетом констант анизотропии 6-го порядка для полярной системы координат, в которой происходит вращение вектора магнитного поля возбуждения и вектора намагниченности плёнки (Рис. 2), были получены в [9]. Плотность зеемановской энергии во вращательном магнитном поле с амплитудой H_0 и угловой скоростью вращения ω в присутствии измеряемого магнитного поля с компонентами H_x, H_y, H_z может быть записана:

$$E_H = -M_s \left((H_x \cos \varphi + H_y \sin \varphi + H_0 \cos(\omega t - \varphi)) \cos \delta + H_z \sin \delta \right), \quad (1)$$

где M_s – намагниченность насыщения феррограната, φ – азимутальный угол вектора намагниченности в плоскости пленки, отсчитываемый от направления $[1\bar{1}0]$ (x) к $[11\bar{2}]$ (y), и δ – угол между направлением вектора намагниченности и плоскостью пленки. Принимая δ малой величиной, условия равновесного положения вектора намагниченности, имеющего две степени свободы φ и δ , могут быть записаны:

$$\begin{aligned} & \frac{\sqrt{2}}{6} (6H_1 + H_2) \delta \cos 3\varphi - \frac{1}{18} H_2 \sin 6\varphi - \\ & - H_x \sin \varphi + H_y \cos \varphi + H_0 \sin(\omega t - \varphi) = 0 \end{aligned}, \quad (2a)$$

$$\left(H_{\perp} + H_2 \left(\frac{1}{18} \cos 6\varphi \right) + H_x \cos \varphi - H_y \sin \varphi - H_0 \cos(\omega t - \varphi) \right) \delta - \frac{\sqrt{2}}{18} (6H_1 + H_2) \sin 3\varphi - H_z = 0 \quad (2b)$$

где $H_{\perp} = 4\pi M_s - 2H_U - H_1 + H_2/9$ имеет смысл поля насыщения при приложении магнитного поля перпендикулярно к плоскости пленки (111) [6], $H_U = K_U/M_s$, K_U – константа одноосной анизотропии; $H_1 = K_1/M_s$, $H_2 = K_2/M_s$, K_1 и K_2 – это первая и вторая константы кубической анизотропии феррограната. Принимая измеряемое поле H_x , H_y , H_z , а также H_1 , H_2 , в качестве малых величин по сравнению с H_{\perp} , величину δ можно выразить в форме:

$$\delta = \frac{H_z}{H_{\perp}} + \frac{\alpha}{3} \sin 3\varphi, \quad (3)$$

где $\alpha = -\frac{\sqrt{2}}{6} \frac{6H_1 + H_2}{H_{\perp}}$. На основании результатов, опубликованных в [6],

отставание фазы вектора намагниченности от направления поля возбуждения в плоскости пленки является малой величиной. Из уравнения (2a) используя (3) его можно получить в форме:

$$\Delta\varphi = \omega t - \varphi \approx \sin(\omega t - \varphi) = \frac{H_x}{H_0} \sin \varphi - \frac{H_y}{H_0} \cos \varphi + \alpha \frac{H_z}{H_0} \cos 3\varphi + \beta \sin 6\varphi, \quad (4)$$

где $\beta = \frac{1}{18} \left(\frac{H_2}{H_0} - \frac{1}{6} \frac{(6H_1 + H_2)^2}{H_{\perp} H_0} \right)$. Выражая азимут вектора намагниченности как

$\varphi = \omega t - \Delta\varphi$ и учитывая, что это малая величина, компоненты вектора намагниченности сердечника в плоскости пленки могут быть записаны в форме:

$$\begin{aligned} M_x &= M_s \cos \varphi = M_s (\cos \omega t + \Delta\varphi \sin \omega t), \\ M_y &= M_s \sin \varphi = M_s (\sin \omega t - \Delta\varphi \cos \omega t). \end{aligned} \quad (5)$$

Сигналы э.д.с., индуцированные в измерительных катушках, ориентированных своими осями вдоль x и y , будут пропорциональны величинам производных соответствующих компонент вектора намагниченности по времени. Используя обозначение $h_i = H_i/H_0$ можно записать:

$$\frac{\partial M_x}{\partial t} = M_s \omega \left(-\sin \omega t - \frac{5}{2} \beta \sin 5\omega t + \frac{7}{2} \beta \sin 7\omega t + h_x \sin 2\omega t - (h_y + \alpha h_z) \cos 2\omega t + 2\alpha h_z \cos 4\omega t \right), \quad (6a)$$

$$\frac{\partial M_y}{\partial t} = M_s \omega \left(\cos \omega t - \frac{5}{2} \beta \cos 5\omega t - \frac{7}{2} \beta \cos 7\omega t - h_x \cos 2\omega t - (h_y - \alpha h_z) \sin 2\omega t + 2\alpha h_z \sin 4\omega t \right). \quad (6b)$$

Выражения (6а) и (6б) являются основными для анализа сигнала отклика в любой возможной конфигурации феррозонда, использующего феррогранатовую пленку ориентации (111) и вращающееся в плоскости пленки магнитное поле возбуждения. Из выражений (6а) и (6б) можно увидеть, что сигналы э.д.с., на катушках с осями, ориентированными в плоскости пленки, содержат четные гармоники, в которых в свою очередь содержится информация о всех трёх ортогональных компонентах магнитного поля, а также нечетные гармоники, не содержащих полезной информации о внешнем магнитном поле и мешающие измерению компонент магнитного поля. Это означает, что для измерения всех трех ортогональных компонент магнитного поля в принципе достаточно использовать только одну измерительную катушку. Здесь мы должны отметить, что возможность измерения двух компонент магнитного поля в плоскости пленки не зависит от магнитной анизотропии среды, но возможность измерения нормальной компоненты магнитного поля определяется магнитной кристаллографической анизотропией активной среды, то есть коэффициентом α , который имеет смысл отношения эффективного поля кристаллографической анизотропии к полю анизотропии формы. Из (6) можно также увидеть, что чувствительность преобразователя к z -компоненте магнитного поля пропорциональна отношению α/H_0 , что определяет требования к свойствам активной магнитной среды.

ДВУХЭЛЕМЕНТНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Рассмотрим преобразователь магнитного поля, который состоит из двух идентичных чувствительных элементов (Рис. 3) в форме диска из эпитаксиальной пленки феррограната с осями легкой намагниченности близкими к площади пленки. Оба чувствительных диска помещены в собственные системы намагничивания, которые создают вращательные магнитные поля в каждом элементе, и каждый элемент имеет свои сигнальные катушки с осями, параллельными x или y направлениям ($[1\bar{1}0]$ и $[11\bar{2}]$ соответственно). Использование двух идентичных

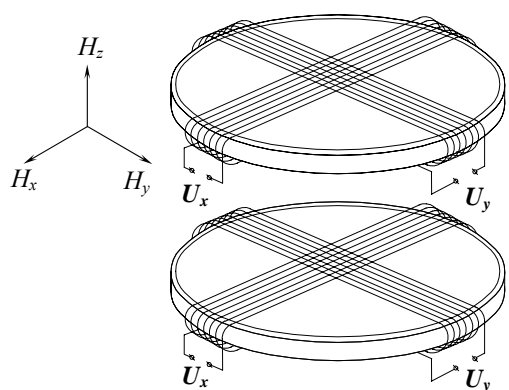


Рис. 3. Схема двухэлементного преобразователя магнитного поля с измерительными катушками.

чувствительных элементов с идентичными сигнальными катушками дает возможность подавления паразитных нечетных гармоник в сигнале отклика, используя последовательное или встречное включение соответствующих измерительных катушек. Но результирующий гармонический состав зависит от взаимной ориентации кристаллографических осей чувствительных элементов, направления вращения магнитного поля возбуждения и начального сдвига фаз между полями возбуждения в двух чувствительных элементах. Изменение направления

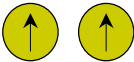

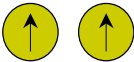

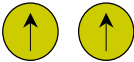

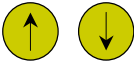

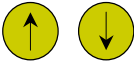

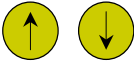

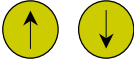

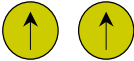

вращения возбуждающего магнитного поля соответствует изменению знака времени в (6). Различная ориентация чувствительных элементов изменяет ориентацию системы координат таким образом, что x - и y - ориентированные сигнальные катушки становятся развернутыми на угол π по отношению к прежней ориентации с соответствующим сдвигом фаз в гармониках сигнала отклика. Все возможные комбинации взаимной ориентации чувствительных элементов, направлений вращения и начального сдвига фаз между полями возбуждения двух чувствительных элементов преобразователя, которые приводят к подавлению нечетных гармоник, представлены в Таблице 1. В последнем столбце таблицы представлены те компоненты магнитного поля или его градиента, которые могут быть измерены двухэлементным преобразователем. Перечисленные конфигурации ограничены двумя взаимными ориентациями чувствительных элементов в плоскости пленки. Одна из них (варианты 1-3 и 8) – это ориентация с совпадающими кристаллографическими осями, что в общем случае соответствует разориентации осей чувствительных элементов в плоскости пленки на угол $n2\pi/3$, где n – целое. Другая (варианты 4-7) соответствует противоположной ориентации элементов или в общем случае разориентации кристаллографических осей элементов в плоскости пленки на $\pi/3 + n2\pi/3$.

В самом простом первом случае (см. Таблицу 1) сигналы отклика, индуцированные в соответствующих катушках двух чувствительных элементов, находящихся вблизи одна к другой, одинаковые и суммируются при последовательном соединении и компенсируются при встречном. Таким образом, эта конфигурация не позволяет выделить измерить компоненты однородного внешнего магнитного поля. Но с другой стороны, она позволяет измерять три ортогональные компоненты пространственного градиента магнитного поля, который существует в зазоре между элементами, помещенными в неоднородное магнитное поле, что и отражено в Таблице 1. Вторая комбинация позволяет измерять все три компоненты магнитного поля любой из измерительных катушек при соответствующем их соединении. Другие конфигурации демонстрируют чувствительность к отдельным компонентам магнитного поля. Конфигурации 3-5 позволяют отдельно измерять только одну компоненту магнитного поля вдоль осей x , y и z соответственно и градиент магнитного поля в других двух направлениях в каждом из случаев. При этом, чувствительность преобразователя к поперечным компонентам магнитного поля при условии его однородности будет отсутствовать. Наоборот, конфигурации 6-8 дают возможность измерять две компоненты магнитного поля и его градиент в третьем направлении.

Следует также отметить, что поворот любой из измерительных катушек, ориентированных своими осями в плоскости пленки, на какой либо угол в плоскости ЭПФГ не изменяет ее возможности получать информацию о соответствующих компонентах магнитного поля или его градиента, а только смещает фазы информативных гармоник и перераспределяет вклад h_z между двумя квадратурными компонентами второй гармоники.

Таблица 1.

Возможные варианты взаимной ориентации чувствительных элементов, направлений вращения и начального смещения фаз между полями возбуждения в чувствительных элементах ($\Delta\Phi$) двухэлементного преобразователя магнитного поля, соединения их измерительных катушек и компоненты магнитного поля или его градиента, которые могут быть измерены при подавлении нечетных гармоник

№	Взаимная ориентация элементов	Направление вращения возбуждающего поля	$\Delta\Phi$	Соединение измерительных катушек / ориентация их осей	Компоненты магнитного поля h_i или его градиента Δh_i , (индексы указывают номер гармоники)
1			0	$\rightarrow \rightarrow / x$ $\rightarrow \leftarrow / y$	$(\Delta h_x)_2, (\Delta h_y)_2, (\Delta h_z)_{2,4}$
2			π	$\rightarrow \rightarrow / x$ $\rightarrow \rightarrow / y$	$(h_x)_2, (h_y)_2, (h_z)_{2,4}$
3			π	$\rightarrow \leftarrow / x$ $\rightarrow \rightarrow / y$	$(h_x)_2, (\Delta h_y)_2, (\Delta h_z)_{2,4}$
4			π	$\rightarrow \rightarrow / x$ $\rightarrow \leftarrow / y$	$(h_y)_2, (\Delta h_x)_2, (\Delta h_z)_{2,4}$
5			π	$\rightarrow \rightarrow / x$ $\rightarrow \rightarrow / y$	$(h_z)_{2,4}, (\Delta h_x)_2, (\Delta h_y)_2$
6			0	$\rightarrow \leftarrow / x$ $\rightarrow \leftarrow / y$	$(h_x)_2, (h_y)_2, (\Delta h_z)_{2,4}$
7			0	$\rightarrow \leftarrow / x$ $\rightarrow \rightarrow / y$	$(h_x)_2, (h_z)_{2,4}, (\Delta h_y)_2$
8			0	$\rightarrow \rightarrow / x$ $\rightarrow \leftarrow / y$	$(h_y)_2, (h_z)_{2,4}, (\Delta h_x)_2$

ВЫВОДЫ

В настоящей работе на основе моделирования когерентного перемангничивания ЭПФГ ориентации (111) с умеренной одноосной анизотропией во вращающемся в плоскости пленки магнитном поле проведен анализ гармонического состава сигнала отклика ферромодуляционного преобразователя магнитного поля, использующего ЭПФГ в качестве сердечника и измерение индуцированной э.д.с. в измерительных катушках. Сигнал состоит из дискретных гармонических составляющих с частотами, кратными частоте вращающегося поля возбуждения, причем информация о трех ортогональных компонентах магнитного поля содержат четные гармоники, а нечетные являются паразитными в спектре сигнала отклика. Возможность измерения перпендикулярной к плоскости пленки составляющей

магнитного поля зависит исключительно от свойств магнитной анизотропии ЭПФГ и чувствительность преобразователя к этой компоненте определяется отношением эффективного поля кристаллографической магнитной анизотропии к эффективному полю анизотропии формы ЭПФГ. Рассмотрены конфигурации двухэлементного преобразователя, позволяющие подавить паразитные нечетные гармоники благодаря последовательному или встречному включению измерительных катушек при соответствующей кристаллографической ориентации чувствительных элементов, направлений вращения и сдвига фаз полей возбуждения в отдельных элементах. Среди возможных конфигураций существуют такие, которые позволяют измерять отдельно одну, две или все три компоненты однородного магнитного поля, либо одну, две или все три компоненты градиента пространственно неоднородного магнитного поля.

БЛАГОДАРНОСТИ

Эта работа была выполнена при частичной поддержке проекта двустороннего украинско-греческого научно-технического сотрудничества (проект М/60-2006) Министерства образования и науки Украины.

Список литературы

1. Perlov A.Ya., Voronko A.I., Vetoshko P.M., Volkovoy V.B.. Three component magnetic field measurement using the cubic anisotropy in (111) YIG films // The 38-th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM-93), Minneapolis, Minnesota, USA, 1993.
2. Primdahl F. The fluxgate magnetometer // J. Phys. E: Sci. Instrum. – 1979. – Vol. 12. – P. 241–253.
3. Афанасьев Ю.В. Феррозондовые приборы.– Л.: Энергоатомиздат, 1986.– 188 с.
4. Vetoshko P.M., Volkovoy V.B., Voronko A.I., Holliday I.E., Solid state induction magnetic vector sensor for the measurement on human heart activity // The 6-th Joint MMM-Intermag Conference. Albuquerque, New Mexico, USA, 1994.
5. Vetoshko P.M., Valeiko M.V., Nikitin P.I., Epitaxial iron garnet film as an active medium of an even-harmonic magnetic field transducer // Sensors and Actuators – 2003 – A. 106 – P. 270-273.
6. Ubizskii S.B., Syvorotka I.M., Vetoshko P.M., Kostyuk P.S., Using magnetic oxide single crystal films as magnetic sensors // 1st European Magnetic Sensors and Actuators Conference (EMSA'96), Iasi, Romania, 1996.
7. Ubizskii S.B., Syvorotka I.M., Vetoshko P.M., Epitaxial iron garnet film as an active medium of the even-harmonic magnetic field transducer // International Conference on Functional Materials (ICFM-2001), Partenit, Crimea, Ukraine, 2001.
8. Ubizskii S.B., Magnetization reversal modeling for (111)-oriented epitaxial films of iron garnets with mixed anisotropy // J. Magn. & Magn. Mat., – 2000.– V. 219 – P. 127–141.
9. Ubizskii S.B., Orientational states of magnetization in (111)-oriented iron garnet films // J. Magn. & Magn. Mat. – 1999. – V. 195. – P. 575–582.

Убизский С.Б., Павлык Л.П., Христофору Е. Моделирование вращательного перемagnичивания монокристаллической феррогранатовой пленки в качестве сердечника преобразователя магнитного поля

Анотация: В работе проведен анализ гармонического состава сигнала отклика ферромодуляционного преобразователя магнитного поля, использующего эпитаксиальную пленку феррограната в качестве сердечника. Рассмотрены конфигурации двухэлементного преобразователя, позволяющие подавить паразитные нечетные гармоники и измерять

отдельно одну, две или все три компоненты однородного магнитного поля.

Ключевые слова: Перемагничивание, вращающееся поле, феррозонд, преобразователь магнитного поля, эпитаксиальная пленка феррограната, сигнал отклика, спектр сигнала.

Убізський С.Б., Павлик Л.П., Хрістофору Е. Моделювання обертального перемагнічування монокристалічної ферогранатової плівки в якості осердя перетворювача магнітного поля

Анотація: В роботі представлено аналіз гармонічного складу сигналу відгуку феромодуляційного перетворювача магнітного поля, в якості осердя якого використовується епітаксійна плівка ферогранату. Розглянуто конфігурації двоелементного перетворювача, які дозволяють скомпенсувати паразитні непарні гармоніки і дозволяють вимірювати окремо одну, дві, чи усі три компоненти однорідного магнітного поля.

Ключові слова: Перемагнічування, поле, що обертається, ферозонд, перетворювач магнітного поля, епітаксійна плівка ферогранату, сигнал відгуку, спектр сигналу.

Ubizskii S.B., Pavlyk L.P., Hristoforou E. Modeling of rotating magnetization reversal of single crystalline iron garnet film as the magnetic field transducer core

Summary: The work presents the harmonic response signal analysis of a magnetic field ferromodulation transducer with core of epitaxial iron garnet film. Dual element transducer configurations are considered, that allows to compensate parasitic odd harmonics, as well as to measure separately one, two or all three components of homogeneous magnetic field.

Keywords: Magnetization reversal, rotating field, fluxgate, magnetic field transducer, iron garnet epitaxial film, response signal, signal spectrum.

*Поступило в редакцію **.**.200**

Убізский Сергей Борисович, Национальный университет “Львовская политехника”, д.ф.-м.н., проф., профессор кафедры полупроводниковой электроники, заведующий лабораторией Научно-исследовательского центра твердотельной электроники и сенсоров; ул. С. Бандеры, 12, Львов, 79013, Украина, Тел.: (032) 258-2696; E-mail: crystal@polynet.lviv.ua.

Павлык Любомир Филиппович, Национальный университет “Львовская политехника”, аспирант кафедры полупроводниковой электроники Института телекоммуникаций, радиоэлектроники и электронной техники; ул. С. Бандеры, 12, Львов, 79013, Украина, Тел.: (032) 258-2696; E-mail: crystal@polynet.lviv.ua

Христофору Евангелос, Национального технического университета Афин, доктор философии, ассистент-профессор Секции металлургии и технологии материалов Школы горно-металлургической инженерии; 9, Heroon Polytechniou Str., Zografou 157 80, Афины, Греция; Тел.: +3210-7722178; E-mail: eh@metal.ntua.gr.