

PACS: 75.50.Ss, 75.60.-d, 75.70.Kw

Ю.М. Николаенко, Н.И. Мезин, В.В. Кононенко, Н.Б. Эфрос

ВЛИЯНИЕ ПОЛЯ ПОДМАГНИЧИВАНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТНОГО СЕНСОРА НА ОСНОВЕ ПЛЕНОК ЖЕЛЕЗОИТТРИЕВОГО ГРАНАТА

Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина

Статья поступила в редакцию 2 октября 2017 года

Экспериментально изучен ряд физических закономерностей, необходимых для оптимизации характеристик магнитных сенсоров, построенных по схеме автодина с преобразованием величины внешнего магнитного поля (МП) в частоту измерительного сигнала. Установлено, что конфигурация полей, обеспечивающая максимальный частотный отклик сенсора на вариацию внешнего поля, соответствует коллинеарной ориентации вектора возбуждающего высокочастотного (ВЧ) поля с вектором поля подмагничивания и с проекцией оси «тяжелого» намагничивания железиттриевого граната (ЖИГ) на кристаллографическую плоскость [111]. Зависимость амплитуды частотного отклика сенсора от величины поля подмагничивания, управляющего структурой магнитных доменов, является немонотонной и представляет собой набор широких пиков. Максимальная разрешающая способность сенсора достигается при двух значениях поля подмагничивания, соответствующих примерно середине интервалов МП, в которых с ростом поля вид доменной структуры изменяется от «паркетной» к «полосовой» и от «полосовой» к монодоменной. При фиксированной величине поля подмагничивания для относительно малых значений внешнего поля сенсор демонстрирует практически линейную характеристику преобразования величины МП в частоту измерительного сигнала.

Ключевые слова: сенсор магнитного поля, пленки железиттриевого граната, феррозонд, магнитометр

Введение

К настоящему времени существенно расширился перечень задач, для решения которых необходимы измерения слабых и сверхслабых магнитных полей. Развитие систем аэрокосмической навигации, систем магнитного позиционирования и локации, медицинской диагностики, сейсмологических исследований, охранных и мониторинговых систем требует создания сравнительно недорогих и высокочувствительных магнитных сенсоров с улучшенными техническими характеристиками. Для удовлетворения актуальных потребностей разработчики предлагают различные типы сенсоров на основе как традиционных, так и новых материалов, в том числе с использованием

новых физических принципов [1,2]. Интерес к магнитным сенсорам на базе эпитаксиальных пленок ЖИГ обусловлен возможностью создания недорогих и удобных для различных применений магнитометрических устройств.

В настоящее время предложено несколько вариантов построения высокочувствительных сенсоров МП на основе пленок ЖИГ. Наиболее изученным и готовым к практическому применению является феррозонд, в котором в качестве магнитоактивной среды используется намагниченная до насыщения пленка в форме диска [3,4]. При возбуждении пленки переменным МП, вращающимся в ее плоскости, в сигнале отклика можно выделить три компоненты измеряемого поля. Магнитометр, созданный на этом принципе, надежно контролирует сверхслабые магнитные поля с напряженностью 10^{-8} Ое [5,6], что является рекордом для некантовых магнитометров.

Альтернативный подход к созданию магнитных сенсоров основан на высокой чувствительности микроскопической структуры доменов пленки ЖИГ к воздействию внешнего МП. Такой режим работы реализуется при использовании возбуждающего ВЧ-поля с относительно малой амплитудой, когда пленка находится в далеком от насыщения состоянии. Направление, коллинеарное к вектору возбуждающего МП, имеет постоянную ориентацию по отношению к кристаллографическим осям пленки и к вектору поля подмагничивания. В простейшем случае такой сенсор может быть реализован по схеме автогенератора (автодина), в котором пленка ЖИГ является сердечником катушки индуктивности резонансного контура. В зависимости от величины внешнего МП пленка изменяет резонансную частоту и добротность контура, что позволяет регистрировать изменения поля по изменению амплитуды колебаний или рабочей частоты сенсора.

Экспериментальный образец магнитометра, созданного на основе автогенератора, продемонстрировал высокие значения динамического и частотного диапазонов МП (10^{-6} –5 Ое и 0–2 GHz соответственно) [7]. Этот принцип построения сенсоров был успешно применен при разработке многоканального магнитометра, предназначенного для мониторинга малых изменений МП в выделенной области пространства [8]. Тем не менее оптимизация характеристик сенсора в отношении обеспечения максимальной разрешающей способности, снижения уровня флуктуационных шумов, формирования диаграммы направленности и др. является многофакторной задачей, для решения которой требуются дополнительные, прежде всего экспериментальные, исследования. Среди наиболее важных факторов, влияющих на основные характеристики сенсора, следует отметить необходимость оптимизации размеров и формы пленки, конфигурации измерительных полей, рабочих частот, оптимальных величин возбуждающего поля и поля подмагничивания.

Кроме того, важно соблюсти определенную ориентацию кристаллографических осей пленки по отношению к вектору возбуждающего МП. Действительно, как нами было показано ранее [9], в зависимости от этой ориентации разрешающая способность (чувствительность) сенсора может изменять-

ся в несколько раз. Учет данного обстоятельства важен при производстве серии датчиков МП для обеспечения идентичных характеристик. Отметим также, что в работе [9] была обнаружена возможность формирования относительно узкой диаграммы направленности сенсора, на которую влияют форма пленки и условия ее взаимодействия с измерительными полями.

В отношении выбора размера реальных ЖИГ-пленок для оптимизации характеристик сенсоров следует иметь в виду еще одну особенность. Пленки в нулевом внешнем поле обладают семейством ориентационных состояний намагниченности, что приводит к сложному поведению магнитного момента при намагничивании пленки [10]. Фактически в ней образуются макроскопические блоки с отличающимся видом доменной структуры, что, в конечном счете, существенно влияет на характеристики сенсоров. Наличие таких блоков, по-видимому, вызвано не только большим макроскопическим размером пленки, но и наличием в ней структурных дефектов. Этот вопрос изучен пока недостаточно, хотя ясно, что производство высококачественных пленок и приготовление образцов с минимальным количеством структурных дефектов, играющих роль центров пиннинга доменных границ, представляют собой отдельную задачу.

В настоящей работе мы исследуем влияние условий взаимодействия эпитаксиальных пленок ЖИГ с «внутренними» полями сенсора (полями возбуждения и подмагничивания) на разрешающую способность сенсора, построенного по схеме автодина с преобразованием величины внешнего МП в частоту измерительного сигнала.

Результаты исследований и обсуждение

Схематически сенсор МП представляет собой автогенератор. В качестве активного элемента использована генераторная часть промышленно выпускаемого прибора Ш1-1 или миниатюрный генератор, собранный на одном транзисторе КТ-3130А и конструктивно размещенный вместе с резонансным контуром в отрезке металлического волновода 8-миллиметрового СВЧ-диапазона. Двусторонние ЖИГ-пленки в форме дисков диаметром 3 и 6.5 mm на монокристаллических подложках гадолиний-галлиевого граната толщиной 0.5 mm применяли в качестве сердечника катушек индуктивности, входящих в состав резонансного контура. Относительно большие величины МП контролировали магнитометром Ш1-8, а малые вариации поля рассчитывали по величине тока в модуляционных обмотках электромагнита. Рабочую частоту сенсора контролировали цифровым частотомером ЧЗ-57.

С точки зрения экспериментальной методики изменения частоты резонансного контура обусловлены изменением индуктивности катушки вследствие изменения магнитной проницаемости пленки, которую будем характеризовать эффективным значением $\mu_{\text{eff}} = L/L_0$. Поскольку катушка с пленкой представляет собой достаточно высокочастотную систему, резонансная частота контура может быть оценена по формуле Томсона $\omega_0 = (LC)^{-1/2}$. Тогда

измеряемая частота будет характеризовать эффективную магнитную проницаемость: $\mu_{\text{eff}}(H) = F_0/F(H)$, где $F_0 = \omega_0/2\pi$ – резонансная частота контура с катушкой без сердечника.

В литературе рассматривается несколько механизмов взаимодействия ЖИГ-пленок с возбуждающим ВЧ-полем при наличии доменной структуры [11]. Это взаимодействие ВЧ-поля с внутренними магнитными моментами доменов (прецессия магнитных моментов и вариация полей «размагничивания» на границах доменов), возбуждение колебаний в доменных стенках и движение доменных границ.

Для практического использования пленок в качестве чувствительного элемента важно знать, какая конфигурация полей является наиболее эффективной. Сразу следует отметить, что при нулевой величине поля подмагничивания H_{in} частотный отклик сенсора на малые вариации МП относительно мал, и, как будет показано ниже, он немонотонно повышается с ростом H_{in} . При постоянной величине H_{in} максимальная амплитуда отклика соответствует параллельной его ориентации с направлением, коллинеарным вектору ВЧ-поля, причем при нарушении этой конфигурации величина отклика убывает. Представленные ниже результаты измерений соответствуют именно такой геометрии полей.

На рис. 1 показана зависимость рабочей частоты сенсора на основе ЖИГ-пленки в форме диска диаметром ~ 3 mm от внешнего МП в больших пределах (от -200 до 200 Oe), достаточных для полного перемагничивания пленки. Как видим, по мере возрастания величины поля значительное уменьшение частоты (рост магнитной проницаемости) происходит на участке от 0 до ~ 30 Oe. При дальнейшем росте поля производная dF/dH изменяет знак, и наблюдается повышение частоты (уменьшение магнитной проницаемости) вплоть до величины поля 80–100 Oe. При больших значениях МП зависимость становится слабой, что свидетельствует о переходе пленки в состояние насыщения намагниченности. Таким образом, процесс перемагничивания пленки до насыщения происходит в пределах поля $-100 < H < 100$ Oe, а внутри этой области, в окрестности поля $H \approx 30$ и -30 Oe есть особые точки, где достигаются максимальная величина μ_{eff} и минимум добротности. Для выяснения связи наблюдаемой зависимости с процессом изменения вида доменной структуры мы провели дополнительное исследование.

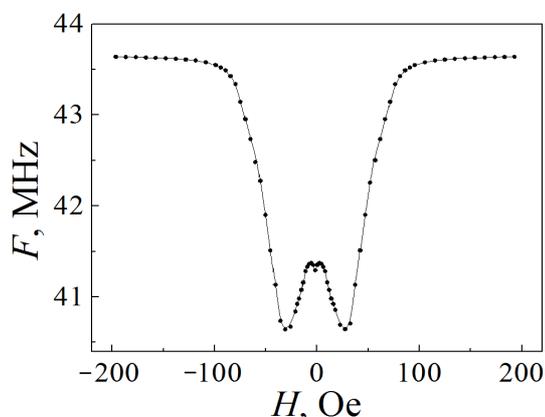


Рис. 1. Зависимость рабочей частоты сенсора от величины поля подмагничивания

На рис. 2 представлены изображения доменной структуры пленки при двух значениях постоянного МП. Для получения изображений был использован оптический поляризационный микроскоп (Axioscop 40 Pol Carl Zeiss), принцип действия которого основан на эффекте Фарадея. Контрастное изображение доменов в таком микроскопе можно получить только при наличии компонентов намагниченности доменов в нормальном к плоскости пленки направлении. То есть светлые и темные области на рис. 2 соответствуют доменам, имеющим в этом направлении компоненты намагниченности с противоположным направлением. При этом векторы намагниченности лежат в основном в плоскости пленки. Данный вопрос ранее рассматривался, например, автором работы [12].

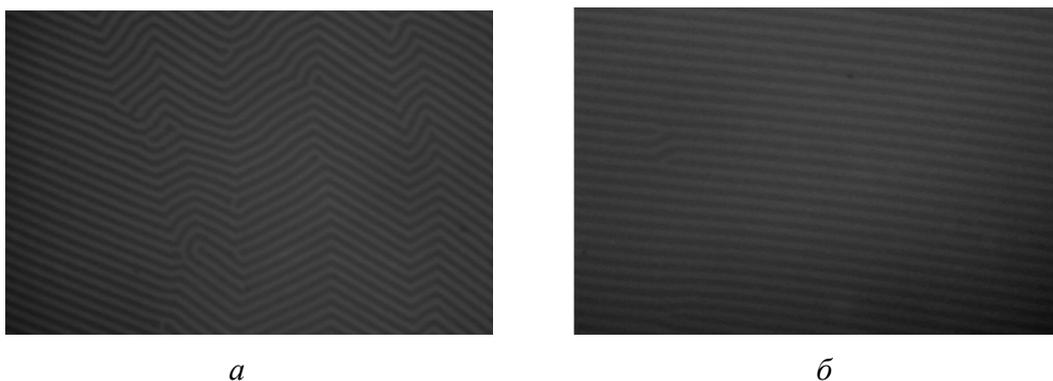


Рис. 2. Вид доменной структуры на участке пленки ЖИГ при величине внешнего магнитного поля $H = 0$ (*a*) и $H = 18$ Oe (*б*)

При нулевом поле подмагничивания наблюдается преимущественная ориентация полос доменов вдоль трех направлений в плоскости пленки (рис. 2,*a*), которые образуют между собой угол в 120° («паркетная» доменная структура). Ранее в работе [9] нами было установлено, что эти направления принадлежат семейству кристаллографических осей $\langle 112 \rangle$. При $H_{in} = 18$ Oe картина доменной структуры соответствует «полосовой» структуре (рис. 2,*б*). Направление полос близко к направлению внешнего МП. В полях $H_{in} > 30$ Oe контраст изображения ослабляется вследствие радикального уменьшения нормальных к плоскости пленки компонент намагниченности доменов, и при больших значениях поля наблюдение картины доменной структуры становится невозможным. Тем не менее, исходя из вида кривой, приведенной на рис. 1, следует заключить, что монодоменная структура формируется при возрастании полей до значений 80–100 Oe.

Отметим, что при $H_{in} = 0$ в пленке одновременно наблюдается набор макроскопических областей (блоков), в которых вид доменной структуры в большей или меньшей степени отличается. То есть оптимизация доменной структуры по принципу минимума энергии взаимодействия в реальной макроскопической пленке происходит как внутри блоков, так и между блоками. Исходя из практических наблюдений, модификация вида доменной структу-

ры с ростом МП происходит в такой последовательности: от «лабиринтной» и «паркетной» к «полосовой». Хотя в отдельных блоках эта последовательность может нарушаться. Подобный факт ранее отмечен в работе [12]. Дальнейший переход от «полосовой» к монодоменной структуре связан с подавлением (уменьшением доли) энергетически невыгодных доменов. Автор [12] выделяет два механизма, обусловленных смещением границ. В первом случае последовательно изменяется ширина светлых и темных полос, во втором – уменьшается длина отдельных энергетически невыгодных доменов.

Таким образом, в отношении зависимости, приведенной на рис. 1, следует выделить две области: $0 < H < 30$ Ое и 30 Ое $< H < 100$ Ое. В первой с ростом МП происходит сложное преобразование вида доменной структуры (внутри блоков и между ними), а во второй работает в основном механизм подавления энергетически невыгодных доменов в процессе перехода от «полосовой» к монодоменной структуре.

Далее рассмотрим полевые зависимости частотного отклика сенсора на основе пленки большего размера. В эксперименте использована двусторонняя пленка ЖИГ толщиной ~ 10 μm в форме диска диаметром 6.5 mm. Кроме того, пленка является более дефектной, чем первая, она имеет ряд повреждений в виде царапин, полученных при механической обработке образца.

На рис. 3, I, а приведена зависимость частоты автогенератора от величины поля подмагничивания в интервале 0–25 Ое, а на рис. 3, I, б – зависимость частотного отклика ΔF от величины малых вариаций МП. Частотный отклик формируется в результате воздействия на пленку зондирующего сигнала, представляющего собой прямоугольные магнитные импульсы в форме меандра амплитудой 0.5 Ое и периодом 20 s. Как видно, зависимость $F(H)$ при большом разрешении нелинейна. Кроме того, в малых полях ($H < 6$ Ое) эта зависимость проявляет явный гистерезис. С точки зрения физики гистерезис отражает возможность многочисленных вариантов формирования доменной структуры в зависимости от конкретных условий и предыстории.

С ростом МП ($H > 6$ Ое) гистерезис становится менее выраженным. При этом зависимость частотного отклика сенсора $-\Delta F(H)$ является очень немонотонной – в виде трех последовательных пиков с разной амплитудой. Естественно предположить, что такой сложный вид зависимости $-\Delta F(H)$ вызван процессом модификации доменной структуры. Это возможно, если существенный вклад в величину магнитной проницаемости пленки дает механизм, связанный с движением (смещением) доменных границ. В таком случае природа нелинейности $F(H)$ и немонотонной зависимости $\Delta F(H)$ естественно объясняется наличием в пленке барьеров (центров пиннинга), препятствующих смещению доменных границ.

На рис. 3, II представлены зависимости, аналогичные приведенным на рис. 3, I, в более широком интервале полей. Измерения проведены на той же пленке, но на более высоких частотах. Как видно, в интервале полей $H > 30$ Ое форма кривой $F(H)$ по сравнению с аналогичной зависимостью, приведен-

ной на рис. 1, является менее гладкой. Наличие явных искажений кривой в виде дополнительных перегибов естественно связать с дефектностью пленки большего размера и с наличием в ней центров пиннинга для смещения доменных границ. В результате в интервале полей $30 < H < 80$ Oe зависимость отклика $\Delta F(H)$ (рис. 3, II, б) имеет более сложный вид. Если участки зависимости $F(H)$ аппроксимировать двумя отрезками прямой линии (см. рис. 3, II, а), то с учетом их наклона расчетная величина частотного отклика получается в два-три раза меньше по амплитуде, чем максимальные экспериментально измеренные значения ΔF (рис. 3, II, б). Следовательно, наличие дефектов может повысить разрешающую способность сенсора при использовании оптимальной величины поля подмагничивания.

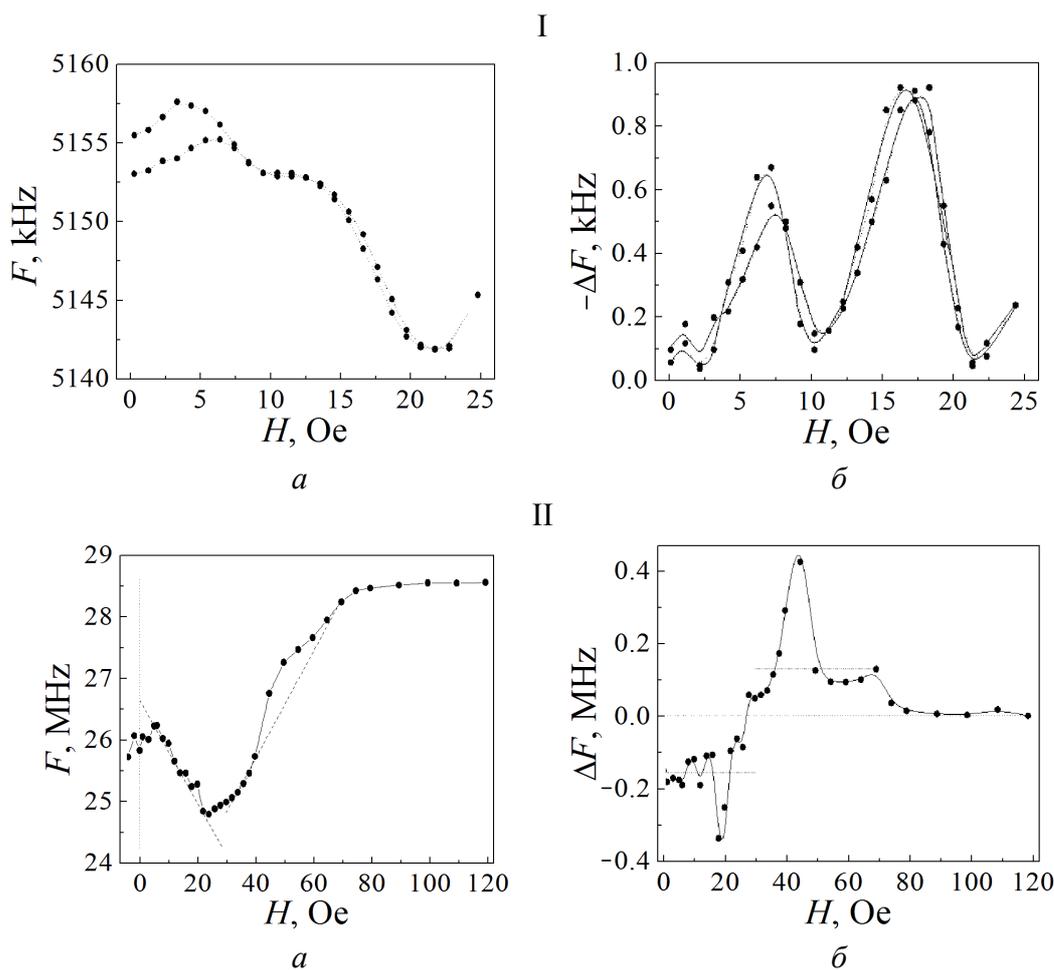


Рис. 3. Зависимость от величины магнитного поля рабочей частоты сенсора (а) и частотного отклика сенсора на малые вариации поля в различных интервалах полей (б): I – $H = 0-25$ Oe, II – $H = 0-120$ Oe

Отметим тот факт, что нелинейность зависимости $F(H)$ не является большим препятствием для контроля величины МП в интервале 30–80 Oe. В то же время эта возможность не представляет какого-либо практического интереса, поскольку в данной области хорошо работают другие сенсоры, на-

пример датчики Холла. Более интересной является область малых полей ($H < 1$ Ое). Для контроля малых значений внешнего магнитного поля поле подмагничивания устанавливается фиксированным, а сенсор по изменению рабочей частоты контролирует отклонение МП от этого значения. Для примера на рис. 4 приведена зависимость изменения частоты автодина от величины измеряемого поля при значении $H_{in} = 38$ Ое. Как видно, в этом режиме сенсор демонстрирует линейную характеристику преобразования относительно малых значений МП в частоту сенсора при достаточно высоком коэффициенте преобразования ($\Delta F/\Delta H \sim 10^5$ Hz/Ое).

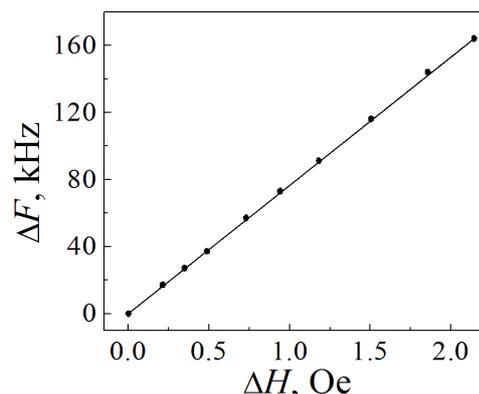


Рис. 4. Зависимость изменений рабочей частоты сенсора от величины внешнего МП

Выводы

1. Оптимальная конфигурация полей для работы сенсора соответствует коллинеарной ориентации вектора возбуждающего ВЧ-поля с вектором поля подмагничивания, причем максимальная разрешающая способность сенсора достигается при совпадении этой ориентации с проекцией оси «тяжелого» намагничивания ЖИГ на кристаллографическую плоскость [111].

2. Зависимость амплитуды частотного отклика сенсора от величины поля подмагничивания, управляющего структурой магнитных доменов, является немонотонной и представляет собой набор широких пиков. Максимальная разрешающая способность сенсора МП достигается при двух значениях поля подмагничивания, соответствующих примерно середине интервалов МП, в которых с ростом поля вид доменной структуры изменяется преимущественно от «паркетной» к «полосовой» и от «полосовой» к монодоменной.

3. При фиксированной величине поля подмагничивания для относительно малых значений внешнего МП сенсор демонстрирует практически линейную характеристику преобразования величины поля в частоту измерительного сигнала и высокий коэффициент преобразования ($\Delta F/\Delta H \sim 10^5$ Hz/Ое).

4. Из анализа экспериментальных данных сделан вывод о том, что важный вклад в эффективность преобразования величины МП в рабочую частоту сенсора обеспечивает физический механизм, связанный с движением (перемещением) доменных границ.

1. J.E. Lenz, Proc. IEEE **78**, 973 (1990).
2. С. Сысоева, Компоненты и технологии № 3, 18 (2011).
3. A. Garcia, C. Moron, M. Mora, Sensors and Actuators **81**, 204 (2000).
4. A. Garcia, C. Moron, IEEE Trans. Magn. **38**, 3312 (2002).

5. П.М. Ветошко, Н.А. Гусев, Д.А. Чепурнова, Е.В. Самойлова, И.И. Сыворотка, И.М. Сыворотка, А.К. Звездин, А.А. Коротаева, В.И. Белотелов, Письма в ЖТФ **42**, вып. 16, 64 (2016).
6. A.E. Rogachov, P.M. Vetoshko, N.A. Gusev, M.A. Kozhaev, A.R. Prokorov, V.V. Popov, D.V. Dodonov, A.G. Shumilov, A.N. Shaposhnikov, V.N. Berzhansky, A.K. Zvezdin, V.I. Belotelov, Appl. Phys. Lett. **109**, 162403 (2016).
7. N.I. Mezin, G.S. Yarosh, B.R. Livshyts, 7th European Magnetic Materials and Applications Conference EMMA'98, Zaragoza, Spain (1998), Fr-P159.
8. Патент України на корисну модель № 38698, Магнітометр для контролю малих змін магнітного поля, М.І. Мезін, Ю.М. Ніколаєнко, Опубл. 12.01.2009, Бюл. № 1.
9. Ю.М. Николаенко, Н.И. Мезин, Н.Б. Эфрос, В.И. Каменев, ФТВД **24**, № 3–4, 73 (2014).
10. S.B. Ubizskii, JMMM **219**, 127 (2000).
11. А.Г. Гуревич, Ферриты на сверхвысоких частотах, Физматгиз, Москва (1960).
12. С.Б. Убізький, Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Електроніка № 397, 77 (2000).

Yu.M. Nikolaenko, N.I. Mezin, V.V. Kononenko, N.B. Efros

EFFECT OF MAGNETIC BIAS FIELD ON THE CHARACTERISTICS OF THE MAGNETIC SENSOR BASED ON YTTRIUM IRON GARNET FILMS

We have experimentally studied a number of physical laws that are necessary for optimizing the characteristics of magnetic sensors constructed with using the autodyne scheme with the conversion of the magnitude of the external magnetic field (MF) into the frequency of the measuring signal. It is shown that the field configuration providing the maximum frequency response of the sensor to a small variation of the external field is related to the collinear orientation of the vector of exciting high frequency (HF) field with the bias field vector as well as the projection of the «heavy» magnetization axis of yttrium iron garnet (YIG) on the crystallographic plane [111]. The bias field dependence of the frequency response amplitude of the sensor is a nonmonotonic function in the form of a set of wide peaks. The maximum resolving power of the sensor is achieved at two values of the bias field corresponding approximately to the middle of the MF intervals, in which the form of the domain structure changes from «parquet-like» to «strip-like» and from «strip-like» to «single domain» as the field increases. At a fixed value of the bias field and relatively small values of the external field, the sensor demonstrates almost linear characteristics of the conversion of the MP value to the frequency of the measurement signal.

Keywords: magnetic field sensor, iron yttrium garnet films, ferroprobe, magnetometer

Fig. 1. Bias magnetic field dependence of the sensor frequency

Fig. 2. Form of the domain structure at the YIG film region at the MF values $H = 0$ (a) and $H = 18$ Oe (b)

Fig. 3. Magnetic field dependence of the sensor frequency (a) and the frequency response of the sensor to small variation of MF (b): I – $H = 0–25$ Oe, II – $H = 0–120$ Oe

Fig. 4. External magnetic field dependence of the sensor frequency variation