

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

## СЕНСОР ИЗМЕНЕНИЙ МАЛЫХ ВЕЛИЧИН И НАПРАВЛЕНИЙ ПОСТОЯННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина НАН Украины  
ул. Р. Люксембург, 72, г. Донецк, 83114, Украина

Статья поступила в редакцию 5 ноября 2014 года

*Экспериментально исследовано влияние анизотропных магнитных свойств эпитаксиальных пленок железомитриевого граната (ЖИГ) на характеристики сенсоров, предназначенных для мониторинга малых изменений магнитного поля (МП) с временным масштабом 1–10 с. Показано, что реальная чувствительность сенсоров критически зависит от ориентации возбуждающего высокочастотного (ВЧ) поля по отношению к кристаллографическим осям пленки и подложки. Выявлена возможность формирования у сенсоров узкой диаграммы направленности и избирательной чувствительности к направлению вектора внешнего МП.*

**Ключевые слова:** сенсор, магнитное поле, чувствительность, анизотропия, магнитная восприимчивость, диаграмма направленности

*Експериментально досліджено вплив анізотропних властивостей епітаксійних плівок залізоітрієвого гранату (ЗІГ) на характеристики сенсорів, що призначені для моніторингу малих змін магнітного поля (МП) за часовим масштабом 1–10 с. Доведено, що реальна чутливість сенсорів критично залежить від орієнтації високочастотного (ВЧ) поля збудження по відношенню до кристаллографічних осей плівки та підкладки. Знайдено можливість формування у сенсорів вузької діаграми спрямованості та вибіркової чутливості до орієнтації вектора зовнішнього МП.*

**Ключові слова:** сенсор, магнітне поле, чутливість, анізотропія, магнітна сприйнятливність, діаграма спрямованості

Существует несколько научных и технических задач, для решения которых необходим магнитный мониторинг внешней среды с целью контроля флуктуаций МП различного временного и амплитудного масштаба. Это, прежде всего, решение экологических задач, связанных с длительным воздействием вариаций МП на живые организмы [1]. Контроль временных изменений МП для предсказания землетрясений, разрушений трубопроводов и железобетонных конструкций. Контроль перемещения через контролируруемую зону магнитоактивных предметов (мобильных телефонов, изделий из черных металлов, радиотехнических устройств, стандартного оружия) [2].

В настоящее время на рынке широко представлены магнитометры для научных, в том числе медицинских и биологических, исследований. Отдельный класс представляют различные системы таможенного контроля. Предельную чувствительность (на уровне  $10^{-14}$  Т) обеспечивают СКВИД-магнитометры. Для работы таких устройств необходимо глубокое охлаждение сенсорных ячеек до температур жидкого гелия. Кроме того, для контроля столь малых изменений МП требуется создание специальных условий, поэтому такие системы являются стационарными и дорогостоящими. Высокоточные магнитометры для научных исследований на основе ядерного магнитного резонанса менее громоздки, но так же, как и магнитометры на основе эффекта Холла, не позволяют контролировать относительно малые ( $< 10^{-4}$  Т) значения МП. Вместе с тем следует отметить, что в литературе есть сообщения о разработке холловских датчиков с более высокой чувствительностью – вплоть до  $10^{-7}$  Т. Магнитометры и металлоискатели, работающие на индукционном принципе, характеризуются более высокой (до  $10^{-12}$  Т) чувствительностью. Они хорошо контролируют переменные поля и относительно быстрые изменения МП, но не предназначены для контроля медленных вариаций МП с временным масштабом  $> 1$  с. Это ограничение характерно и для многих разновидностей магнитометров на основе феррозондов, построенных с использованием сердечников из поликристаллических ферритов. Необходимо отметить, что стационарные металлоискатели для таможенного контроля также используют индукционный принцип. К недостаткам существующих систем следует отнести то, что они чувствительны как к магнитоактивным, так и к электропроводящим предметам (шоколад в обертке из алюминиевой фольги), поэтому для идентификации объекта требуется неудобная процедура дополнительного контактного досмотра.

Таким образом, существующие приборы не в полной мере удовлетворяют запросам современных технологий, связанных с высокочувствительным контролем относительно медленных вариаций МП. В работе [2] для магнитного мониторинга выделенной области пространства было предложено многоканальное устройство, в котором в качестве сенсоров применяются эпитаксиальные пленки ЖИГ. В настоящей работе представлены результаты исследований дополнительных возможностей, которые возникают при использовании ферромагнитных пленок с анизотропными магнитными характеристиками.

Пленки ЖИГ интенсивно и всесторонне изучались в 70–80-е гг. прошлого столетия для разработки устройств магнитной памяти, основанной на создании и управлении структурой цилиндрических магнитных доменов. К настоящему времени актуальность части результатов была утрачена в связи с разработкой более совершенных устройств компьютерной памяти на основе иных принципов. Тем не менее возможность использования ЖИГ-пленок для создания высокочувствительных сенсоров МП вызвала новый интерес к их исследованию. В частности, автор более поздней работы [3] представил

результаты моделирования процессов анизотропного намагничивания в пленках ЖИГ, выращенных методом жидкофазной эпитаксии на подложках гадолиний-галлиевого граната (ГГГ) с ориентацией [111]. Из-за большой величины фактора размагничивания спонтанная намагниченность в нормальном к пленке направлении ослаблена, и результирующий вектор намагниченности лежит под небольшим углом по отношению к поверхности пленки. Процесс перемагничивания пленки является анизотропным. Помимо кристаллографической (кубической) анизотропии наблюдается и так называемая «наведенная» анизотропия. Последняя, как правило, характеризуется 180-градусной симметрией и обусловлена технологическими параметрами роста пленки. Общая картина процесса намагничивания пленки во внешнем поле довольно сложная, поскольку зависит от констант анизотропии, от величины и конфигурации воздействующих полей. Кроме того, от величины внешнего МП зависит наличие и вид доменной структуры. При реализации однодоменного состояния в зависимости от ориентации внешнего МП по отношению к кристаллографическим направлениям в плоскости пленки могут реализоваться несколько конфигураций намагниченности, при которых нормальная компонента изменяет знак или исчезает. Плоскостная компонента намагниченности характеризуется тремя осями легкого намагничивания [3].

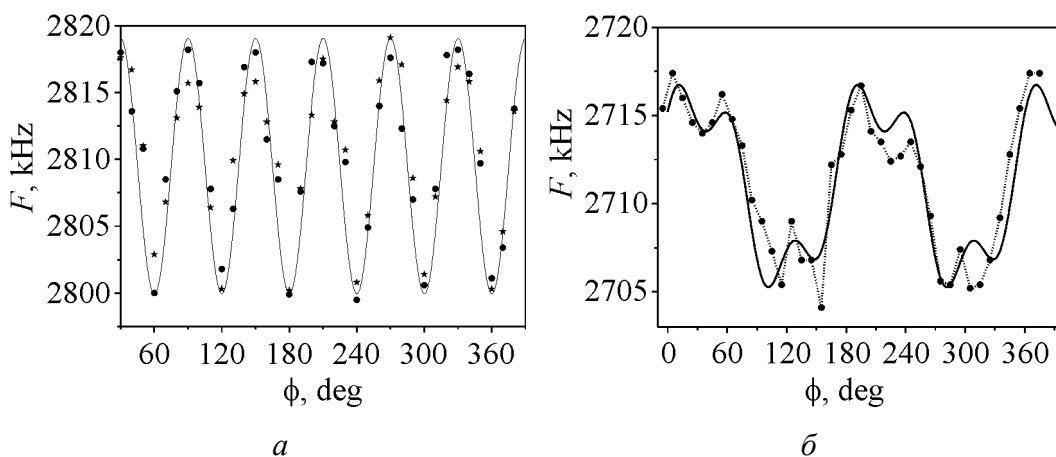
В данной работе исследована магнитная восприимчивость ЖИГ-пленки, находящейся одновременно под воздействием переменного ВЧ-поля и постоянного поля подмагничивания. Направление ВЧ-поля может изменяться по отношению к кристаллографическим осям ЖИГ только в плоскости пленки, а направление поля подмагничивания может быть произвольно заданным.

Ясно, что работа сенсоров МП может быть реализована на основе нескольких физических механизмов, включая зависимость намагниченности и магнитной восприимчивости пленки от вида и динамики доменной структуры, а также от взаимодействия ВЧ-поля с макроскопическим магнитным моментом. Предварительное исследование вида доменной структуры с помощью поляризационного микроскопа показало, что характерный размер доменов в ЖИГ-пленке на ГГГ-подложке в виде диска диаметром 18.5 mm составляет около 5  $\mu\text{m}$ , что примерно совпадает с толщиной пленки. Картина доменной структуры подвижная и легко изменяется в зависимости от величины и направления небольшого внешнего поля подмагничивания, что достаточно хорошо изучено [4].

Исследованная пленка ЖИГ была выращена методом жидкофазной эпитаксии на ГГГ-подложке с ориентацией [111] в нормальном к поверхности направлении. Магнитные характеристики изучали автодинным методом. Пленку помещали в катушку, которая служила резонансным контуром автогенератора, позволяющего в широких пределах изменять амплитуду ВЧ-поля. Направление магнитной составляющей ВЧ-поля совпадало с плоско-

стью пленки. Для изучения угловых зависимостей диск подложки с пленкой с помощью специального механического привода мог вращаться вокруг оси симметрии диска на достаточно точно контролируемый угол.

К важным методическим результатам следует отнести выяснение экспериментальных условий, при которых отдельно проявляется каждый из двух видов анизотропии пленки. На рис. 1 приведены угловые зависимости частоты генератора в режиме малой (не более 50 мОе) амплитуды ВЧ-поля. При наличии внешнего постоянного поля подмагничивания величиной около  $H_0 = 5$  Ое, направление которого коллинеарно с направлением вектора ВЧ-поля, проявляется 120-градусная анизотропия (рис. 1,а). Поскольку для малого переменного ВЧ-поля прямое и обратное направления эквивалентны, фактически наблюдается 60-градусная симметрия кривых  $F(\phi)$ . Ясно, что такой вид кривых вызван кристаллической анизотропией, которая проявляется через угловую зависимость магнитной восприимчивости пленки, причем убывание частоты соответствует ее росту.



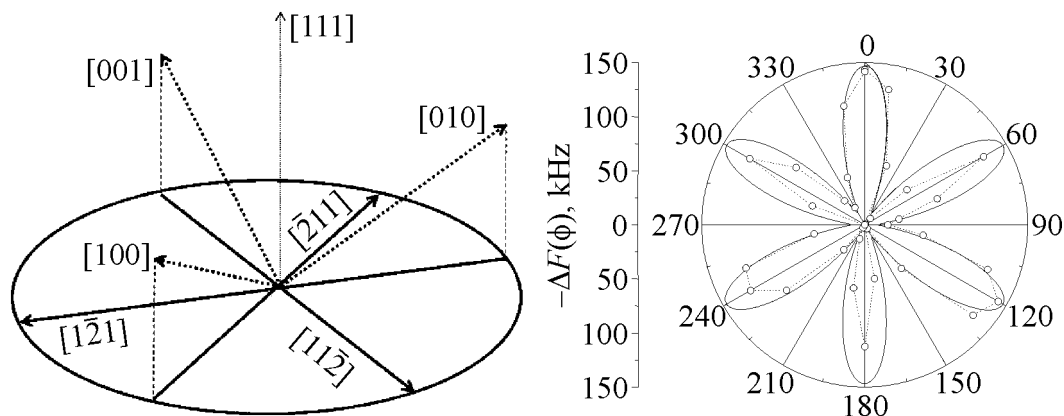
**Рис. 1.** Зависимость резонансной частоты контура от угла между направлением ВЧ-поля и выделенным направлением пленки при постоянном поле подмагничивания  $H_0$ , Ое:  $a - 5$ ,  $b - 0$ ;  $\star$ ,  $\bullet$  – экспериментальные данные; сплошная кривая – зависимость:  $a - F \sim \cos(6\phi)$ ,  $b - F \sim 5.2\cos(2\phi) + 2\cos(6\phi)$

На рис. 1,б приведена такая же зависимость, но в отсутствие поля подмагничивания. Как видно, 180-градусная анизотропия в этом случае проявляется с большей амплитудой. Отметим, что «наведенная» анизотропия превалирует над кристаллической и в случае, когда поле подмагничивания величиной  $H_0 = 5$  Ое ориентировано вдоль нормального к пленке направления.

Таким образом, планарное поле величиной  $H_0 = 5$  Ое, достаточное для формирования однодоменного состояния в пленке, при взаимодействии с ВЧ-полем проявляет кристаллическую анизотропию. Без поля подмагничивания проявляется «наведенная» анизотропия из-за наличия доменной структуры, которая очень чувствительна к центрам пиннинга, обусловленным кристаллическими, структурными и геометрическими дефектами пленки.

Максимальная чувствительность сенсора достигается при оптимальном направлении возбуждающего поля и геометрии образца по отношению к кристаллографическим осям пленки. Для выбора такого направления образец в форме диска с помощью рентгеноструктурного анализа был сориентирован по отношению к кристаллографическим осям, и на его поверхности вдоль оси [112], совпадающей по направлению с проекцией оси [100], на поверхности пленки был нанесен маркер, от которого отсчитывались углы поворота образца в экспериментах.

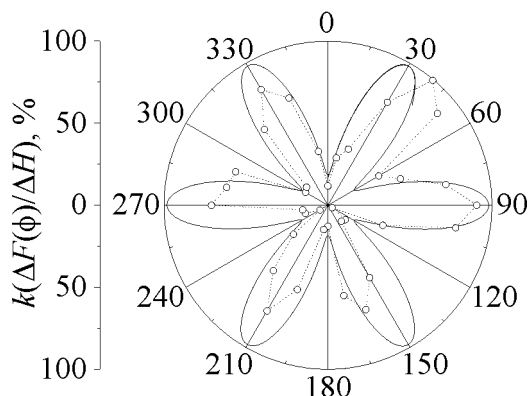
Для наглядности на рис. 2 приведено схематическое расположение актуальных для нашего рассмотрения осей. На рис. 3 в полярных координатах приведена зависимость амплитуды понижения резонансной частоты контура от угла между направлением ВЧ-поля и одной из кристаллографических осей семейства [112].



**Рис. 2.** Схематическое расположение актуальных для экспериментов кристаллографических осей

**Рис. 3.** Зависимость амплитуды понижения резонансной частоты контура от угла между направлением ВЧ-поля и кристаллографической осью [112]

Учитывая тот факт, что понижение частоты соответствует росту магнитной восприимчивости  $\chi$ , следует заключить, что максимум  $\chi$  реализуется в направлениях семейства осей [112]. Эти направления совпадают с проекциями основных осей семейства [100] на поверхность пленки и представляют собой оси легкого намагничивания, что согласуется с данными работы [3]. В отношении чувствительности магнитной восприимчивости к воздействию внешнего МП ситуация иная. На рис. 4 приведена угловая зависимость частотного отклика сенсора на воздействие импульсов внешнего поля величиной  $\sim 50$  мОе, направление которого коллинеарно векторам ВЧ-поля и поля подмагничивания. Как видно, направление, при котором наблюдается максимальная чувствительность сенсора, не совпадает с осями легкого намагничивания. Более того, соответствующие направления сдвинуты от «легких» осей на  $30^\circ$  и совпадают с направлениями, при которых наблюдаются минимумы магнитной восприимчивости (см. рис. 3). Описанные факты точно



**Рис. 4.** Изменение амплитуды частотного отклика сенсора на внешнее импульсное МП в зависимости от угла между кристаллографической осью [112] и направлением коллинеарных векторов ВЧ-поля и поля подмагничивания

соответствуют теоретической зависимости  $\Delta F(\phi)/\Delta H \sim \cos(6\phi + \pi/6)$ , представленной на рис. 4 сплошной кривой. Экспериментальные значения (показаны кружочками) характеризуются некоторым разбросом, тем не менее хорошо подтверждают общий характер зависимости.

Основной механизм взаимодействия, который формирует частотный отклик сенсора, связан, по-видимому, с угловым смещением намагниченности от осей легкого намагничивания к менее выгодному направлению под действием поля подмагничивания и внешнего зондирующего МП. В результате такого взаимодействия восприимчивость пленки является функцией величины и направления МП.

Следующий вопрос касается избирательности сенсора к направлению вектора зондирующего МП.

Исходя из приведенного выше рассмотрения, следует ожидать, что такая избирательность должна быть и максимальная чувствительность должна достигаться при коллинеарном направлении вектора МП. Данные на рис. 5 подтверждают этот вывод. Более того, они свидетельствуют о возможности получения очень узкой диаграммы направленности. Сплошная кривая на рис. 5,а описывается выражением  $\sim |\sin^3(\alpha)|$ , где  $\alpha$  – угол между вектором импульсного зондирующего поля и направлением в плоскости пленки, перпендикулярным направлению ВЧ-поля. Направление, коллинеарное ВЧ-полю, соответствует значению  $\alpha = 90^\circ$ . В эксперименте контролировалось изменение частоты сенсора под действием биполярных прямоугольных импульсов величиной  $\pm 150$  мОе, поэтому измеряемая величина  $\Delta F(\alpha)$  не изменяет знак в области углов  $180$ – $360^\circ$  (на рисунке не показано). Узость диаграммы направленности на рис. 5,а обусловлена только механизмом взаимодействия, поскольку измерения проведены на пленке с подложкой в форме диска. Отметим также, что вектор зондирующего внешнего поля при изменении направления находился в плоскости пленки.

Данные на рис. 5,б соответствуют иной геометрии, при которой зондирующее поле вращается вне плоскости пленки. Кроме того, в сенсоре использована пленка на подложке прямоугольной формы размером  $2.5 \times 6 \times 1$  мм. Диаграмма направленности в этом случае оказалась более широкой –  $\sim |\sin^{1.6}(\alpha)|$ .

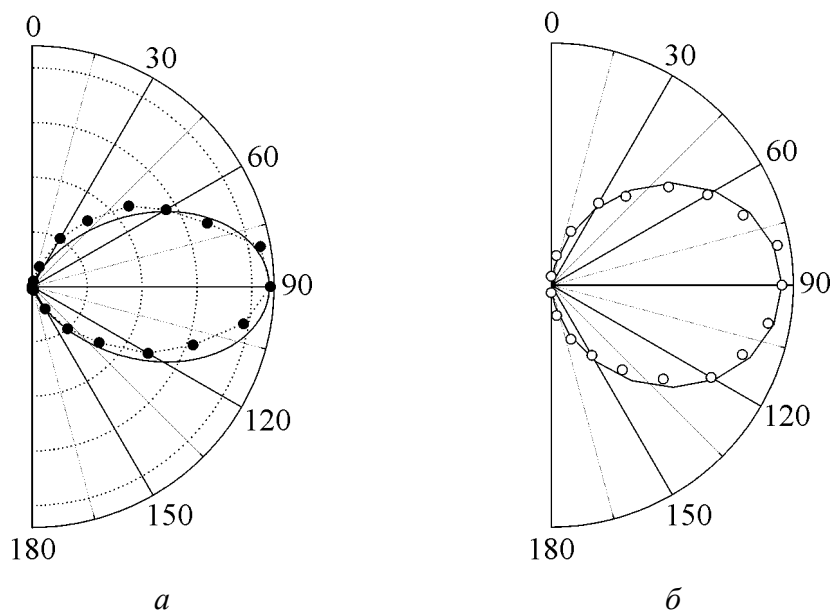
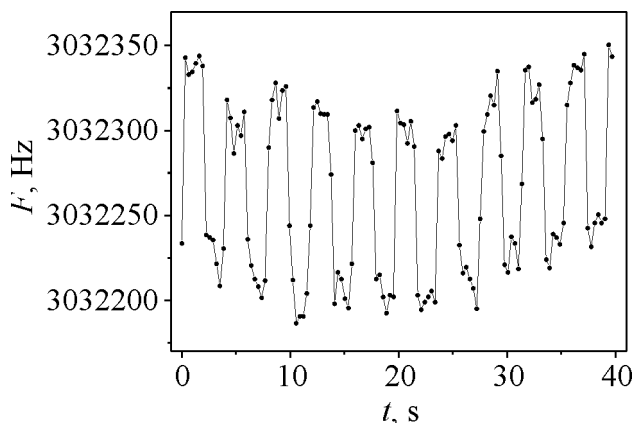


Рис. 5. Диаграмма направленности сенсора к направлению вектор зондирующего МП

В отсутствие поля подмагничивания и при малой амплитуде ВЧ-поля характер взаимодействия в большой степени определяется доменной структурой. Вклад в магнитную восприимчивость вносит взаимодействие поля как с магнитными моментами доменов, так и с доменными границами [5]. При этом любые нерегулярные изменения в доменной структуре приводят к необратимым изменениям восприимчивости пленки, нарушая стабильность работы и ухудшая шумовые характеристики сенсора. Для получения высокой реальной чувствительности в этом режиме в пленках должны отсутствовать центры пиннинга. В реальных пленках в зависимости от амплитуды ВЧ-поля наблюдается оптимум. Исследования доменной структуры оптическим методом (с помощью поляризационного микроскопа) показали, что доменная структура перестает наблюдаться по мере роста до нескольких эрстед ( $< 5$  Ое) как величины поля подмагничивания, так и амплитуды ВЧ-поля. Для разных амплитуд ВЧ-поля оптимальное (для получения максимальной реальной чувствительности сенсора) значение поля подмагничивания разное. Достижимый оптимум также зависит от ориентации кристаллографических осей по отношению к направлению ВЧ-поля. Если ориентацию кристаллографических осей не соблюдать, то максимальная чувствительность серии сенсоров может отличаться на порядок. На рис. 6 приведена временная зависимость рабочей частоты одного из сенсоров 8-канального контроллера при воздействии на него импульсов зондирующего поля величиной  $10^{-3}$  Ое.

Приведенные результаты дают представление о работе устройства и реально достижимой чувствительности сенсоров, использующих зависимость от МП магнитной восприимчивости.



**Рис. 6.** Временная зависимость рабочей частоты сенсора МП при воздействии прямоугольных импульсов зондирующего МП величиной  $10^{-3}$  Ое

### Выводы

Рассмотрена задача по созданию устройств, предназначенных для магнитного мониторинга в выделенном пространстве флуктуаций МП с временным масштабом 1–10 с, на основе эпитаксиальных ЖИГ-пленок.

Показано, что чувствительность сенсоров, эксплуатирующих зависимость магнитной восприимчивости пленки от внешнего МП, может превышать уровень  $10^{-3}$  Ое.

Исследованы физические механизмы, ответственные за ориентационные характеристики магнитной восприимчивости ЖИГ-пленки, выращенной на ГГГ-подложке с нормальным направлением к поверхности кристаллографической оси [111]. Установлено, что максимальную чувствительность сенсоров обеспечивает такая ориентация пленки, при которой направление вектора планарного ВЧ-поля и коллинеарного с ним поля подмагничивания составляет угол  $30^\circ$  по отношению к кристаллографическим осям семейства [112]. При этом минимальная чувствительность реализуется при ориентации ВЧ-поля вдоль осей этого семейства, которые являются осями легкого намагничивания.

Установлено, что сенсоры предложенной нами конструкции характеризуются избирательной чувствительностью по отношению к направлению вектора внешнего МП. В зависимости от угла между векторами внешнего МП и поля подмагничивания их диаграмма направленности может быть достаточно узкой и характеризоваться зависимостью  $\sim |\sin^3(\alpha)|$ . Показано также, что ширина диаграммы направленности может регулироваться путем изменения формы пленки.

1. Ю.А. Холодов, А.Н. Козлов, А.М. Горбач, в кн.: Магнитные поля биологических объектов, М.Г. Айрапетянц (ред.), Наука, Москва (1987), с. 144.
2. Патент України на корисну модель № 38698, М.І. Мезін, Ю.М. Ніколаєнко, Магнітометр для контролю малих змін магнітного поля, Бюл. № 1 від 12.01.2009.
3. S.B. Ubizskii, J. Magn. Magn. Mater. **219**, 127 (2000).



4. Э. Бобек, Э. Дела Торрре, Цилиндрические магнитные домены, Энергия, Москва (1977).
5. А. Малоземов, Дж. Слонзуски, Доменные стенки в материалах с цилиндрическими магнитными доменами, Мир, Москва (1982).

*Yu.M. Nikolaenko, N.I. Mezin, N.B. Efros, V.I. Kamenev*

## SENSOR OF SMALL VARIATIONS OF A MAGNETIC FIELD MAGNITUDE AND DIRECTION

Influence of the anisotropic properties of an yttrium iron garnet (YIG) epitaxial film on the characteristics of magnetic sensors was investigated experimentally. The sensors were intended for control of magnetic field (MF) variation with the temporary scale of 1–10 s. It was shown, that a real sensitivity depends crucially on the orientation of the vector of HF actuating field and crystalline axis of substrate. The possibility of formation of narrow directional diagram of the sensor and selective sensitivity for a magnetic field direction was revealed.

**Keywords:** sensor, magnetic field, sensitivity, anisotropy, magnetic susceptibility, directional diagram

**Fig. 1.** Dependence of the resonant frequency on the angle between the direction of HF actuating field and the marked direction of the film at dc magnetic biasing  $H_0$ , Oe:  $a - 5$ ,  $\bar{b} - 0$ ; ☆, ● – experiment; solid curve illustrates the dependences:  $a - F \sim \cos(6\phi)$ ,  $\bar{b} - F \sim 5.2\cos(2\phi) + 2\cos(6\phi)$

**Fig. 2.** Schematic orientations of crystallographic axes actual for consideration

**Fig. 3.** The dependence of resonant frequency decrease on the angle between the direction of HF actuating field and the crystallographic axe [112]

**Fig. 4.** The variation of magnitude of the frequency response to the external pulse of MF vs the angle between the crystallographic axe [112] and the direction of both HF and dc actuating fields

**Fig. 5.** The directional diagram of the sensor with respect to the orientation of the external MF

**Fig. 6.** Temporal dependence of the sensor operation frequency under action of the rectangular pulses of the external MF by the magnitude of  $10^{-3}$  Oe