

УДК 537.622.4:53.082.78

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВОЙСТВ ПОЛОСОВЫХ ДОМЕННЫХ СТРУКТУР В ПЛЁНОЧНЫХ ЖИГ-РЕЗОНАТОРАХ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ДВУХКОМПОНЕНТНОГО МАГНИТОМЕТРА СЛАБЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

А.Л. Хвалин

(Саратовский государственный университет)

*Представлена конструкция магнитометра, использующего свойства полосовых доменных структур в плёнках железо-иттриевого граната, для одновременного определения величины и направления вектора индукции магнитного поля Земли, либо магнитного поля, создаваемого ферромагнитным объектом. Подобные устройства могут использоваться в магнитной геологоразведке, при диагностике и обнаружении ферросодержащих тел, навигации по магнитному полю Земли, в устройствах наведения и бесконтактного срабатывания для специальных применений.*

**Ключевые слова:** датчик магнитного поля, железо-иттриевый гранат, полосовая доменная структура, преобразователь индукции магнитного поля, магнитоуправляемый генератор.

Устройства, управляемые при помощи внешнего постоянного магнитного поля, широко используются уже более 50 лет. Магнитоуправляемые устройства активного типа, как правило, содержат преобразователь индукции магнитного поля в электрический сигнал и схему его обработки. При разработке переносных и мобильных устройств решающее значение приобретают массогабаритные характеристики устройств. Несмотря на большое число типов преобразователей магнитного поля, требованиям миниатюризации удовлетворяют лишь преобразователи на резонаторах из железо-иттриевого граната (ЖИГ), а также гальваномагнитные и магниторезистивные элементы.

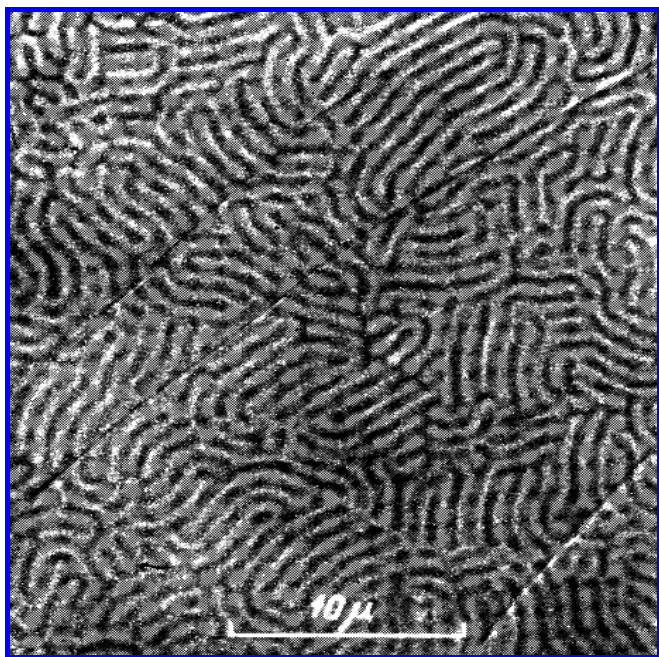
Магнитные интегральные схемы широко распространены и используют гальваномагнитные и магниторезистивные преобразователи. По-видимому, они уже достигли своих предельно возможных характеристик.

Интегральные магнитоуправляемые устройства на ферритовых резонаторах серийно пока не выпускаются. В частности, это объясняется тем, что вблизи ЖИГ-резонатора необходимо размещать магнитную систему, создающую в области резонатора магнитное поле, достаточное для перевода его в режим насыщения. Наличие дополнительной магнитной системы ухудшает массогабаритные характеристики устройств, кроме того, при близком расположении нескольких таких устройств сказывается взаимное влияние их магнитных систем.

В статье представлена конструкция двухкомпонентного магнитометра с относительно небольшой магнитной системой, использующая

свойства полосовых доменных структур в ферритовых плёнках, допускающая её реализацию в интегральном исполнении (или в виде системы на кристалле).

В [1 – 3] представлены результаты информационного поиска по магниточувствительным устройствам, проведён поиск и анализ прототипов созданного магнитометра. Так в патенте RU 2100819 представлен векторный магнитометр, включающий два одинаковых чувствительных к магнитному полю элемента из плёнки ЖИГ, поддерживаемой в насыщенном монодоменном состоянии, с двумя измерительными катушками каждый, средства создания вращающегося магнитного поля и обработки сигнала отклика, средство для компенсации поля в перпендикулярном направлении, двухканальный генератор гармонических колебаний, пользовательский интерфейс. В патенте RU 2218577 описан векторный магнитометр, включающий три одинаковых феррозондовых датчика, схемы их управления и обработки сигналов. Истинное направление вектора измеряемого магнитного поля определяют по равенству сигналов от всех трёх феррозондов в случае, когда каждый из них будет занимать одинаковое угловое положение относительно полного вектора магнитной индукции измеряемого магнитного поля, и это угловое положение соответствует оптимальной чувствительности феррозондов. К недостаткам представленных выше магнитометров можно отнести значительную сложность измерительной схемы и необходимость использования идентичных датчиков магнитного поля, что трудно осуществить на практике.



**Рис. 1. Полосовая доменная структура в ферритовой плёнке с кристаллографическими индексами [111] в отсутствие внешнего магнитного поля**

В патенте RU 2148840 представлен магнитометр на основе индукционного датчика магнитного поля, используемый для определения направления вектора индукции магнитного поля при поиске железорудных месторождений. К недостаткам магнитометра можно отнести необходимость поворота датчика магнитного поля при определении направления на объект, неточности при определении азимутального угла на объект вследствие усреднения величины индукции исследуемого магнитного поля, так как сигнал отклика индукционного датчика пропорционален потоку вектора индукции через поперечное сечение измерительной катушки индуктивности.

Техническое исполнение магнитометрического датчика основано на использовании генератора, управляемого магнитным полем (ГУМ), с частотным выходом. Более подробно конструкция, компьютерное моделирование режимов генерации и экспериментальные исследования представлены в [4 – 7]. Однокомпонентный магнитометрический датчик имеет в своём составе: генератор на полевом или биполярном транзисторе с активным элементом и линией обратной связи; ЖИГ-резонатор (сферический или плёночный) в качестве частотозадающего элемента, помещённый в линию обратной связи генератора, частотомер, вход которого соединён с выходом генератора; плату сопряжения для передачи результатов измерений частоты от частотомера в ЭВМ. ЭВМ предназначена для обработки результатов измерений и вычисления соответствующей

компоненты магнитного поля. Для такого датчика в [8] проведена оценка чувствительности по величине измеряемого магнитного поля, составляющей единицы нанотесла.

Для перевода ЖИГ-резонатора в мономерный режим используется магнитная система в виде постоянного магнита, создающего в области резонатора поле, достаточное для перевода его в насыщенное состояние. Генератор работает на частоте ферромагнитного резонанса, зависящей от намагниченности резонатора, поля магнитной системы и внешнего поля, представляющего собой магнитное поле Земли, ферромагнитного объекта и пр. После первого измерения и определения направления на объект однокомпонентный магнитометрический датчик магнитного поля необходимо переместить, ещё раз с его помощью определить новое направление на объект и затем найти точку пересечения первого и второго направлений, показывающую положение объекта.

Однако такой подход не позволяет достоверно определить положение объекта при наличии локальных возмущений магнитного поля, магнитных помех, а также не применим для определения протяжённых объектов, нескольких объектов, при поиске движущихся объектов и т. д.

В связи с изложенным сформулируем цель настоящего исследования, заключающуюся в разработке магнитометрического датчика простой конструкции на основе конструкции [9] для одновременного определения величины и направления вектора индукции магнитного поля Земли, либо магнитного поля, создаваемого ферромагнитным объектом, т. е. необходимо определить вектор магнитного поля на основе однокомпонентного магнитометрического датчика. Традиционные подходы к решению подобных задач представлены выше и имеют ряд недостатков. Очевидно, что использование одного датчика для определения полного вектора магнитного поля упрощает конструкцию, методики определения полного вектора магнитного поля и позволит с большей точностью определить направление на объект – источник магнитного поля.

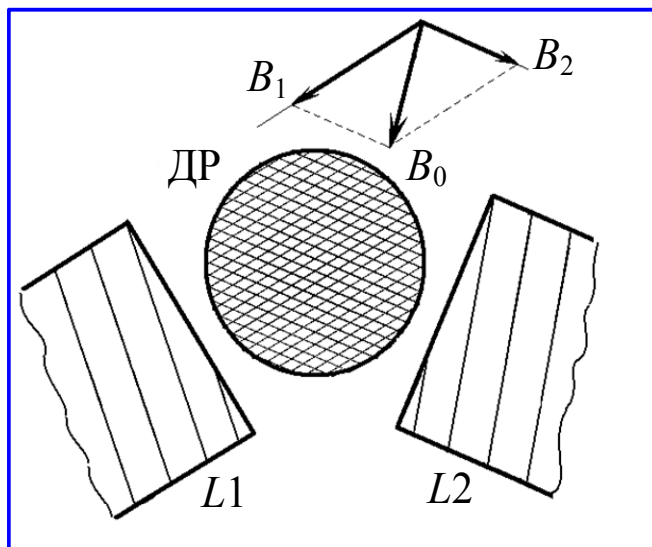
Предложенная в настоящей статье конструкция магнитометра использует свойства полосовых доменных структур (ПДС) в ферромагнитных плёнках с кристаллографическими индексами [111], позволяющими периодически изменять ориентацию вектора намагниченности в плёнке из ЖИГ на  $120^\circ$ .

В основе работы магнитометра использованы свойства полосовых доменных структур в плёнках ЖИГ. На рис. 1 показан типичный вид полосовой

доменной структуры в плёнке ферромагнетика с кристаллографическими индексами [111], имеющей три оси лёгкого намагничивания (ОЛН), углы между которыми в плоскости плёнки равны  $120^\circ$  [10]. Из рис. 1 видно, что отдельные полосовые «макродомены» ориентированы вдоль трёх проекций ОЛН в плоскости плёнки. Похожая картина наблюдается и в плёнках ЖИГ типа [111]. При наличии внешнего постоянного магнитного поля, направленного вдоль одной из ОЛН, доменная структура изменяется, и с увеличением индукции магнитного поля все полосовые домены выстраиваются в направлении ОЛН. Вблизи выступов (углов) образца ЖИГ могут наблюдаться искажения полосовой доменной структуры. Следовательно, если форма образца ЖИГ имеет аксиальную симметрию (дисковый ЖИГ-резонатор), то ПДС будет иметь однородный вид в направлении любой из трёх ОЛН. Таким образом, если включать внешнее магнитное поле сначала с помощью катушки индуктивности, расположенной вблизи дискового ЖИГ-резонатора (ДР) в направлении одной ОЛН, а затем в направлении другой ОЛН, то соответствующие ПДС в ДР будут отличаться только направлением, как показано на рис. 2.

На рис. 2 показана магнитная система магнитометра, имеющая две катушки индуктивности и дисковый резонатор. Как показано на рисунке, можно изменять направление ПДС в дисковом резонаторе с помощью поочередного включения тока в катушках индуктивности  $L1$  и  $L2$ , расположенных относительно ДР таким образом, что угол с вершиной в геометрическом центре ДР и сторонами, направленными по осям симметрии катушек индуктивности, составляет  $120^\circ$ . Возможные направления ориентации ПДС показаны на рис. 2 двумя видами штриховки. Методы расчёта подобных структур представлены в ряде работ, например [7 – 11].

Блок-схема магнитометра показана на рис. 3. Магнитометр содержит генератор с активным элементом и линией обратной связи, резонатор на основе ЖИГ в качестве частотозадающего элемента, помещённый в линию обратной связи генератора, частотомер, вход которого соединён с выходом генератора, блок вычисления, плату сопряжения для передачи результатов измерений частоты от частотомера в блок вычисления, магнитную систему для перевода резонатора в монодоменный режим. Как упоминалось выше, дисковый резонатор выполнен из плёнки ЖИГ с кристаллографическими индексами [111], имеющей три оси лёгкого намагничивания, а магнитная система представляет



**Рис. 2. Формирование в дисковом резонаторе полосовых доменных структур вдоль двух осей лёгкого намагничивания, расположенных под углом  $120^\circ$  (направления осей лёгкого намагничивания показаны разными типами штриховки)**

собой две катушки индуктивности, расположенные вблизи резонатора таким образом, чтобы их оси были ориентированы под углом  $120^\circ$  с вершиной в геометрическом центре резонатора, подключенные к источнику импульсного тока, причём одна из катушек подключена к источнику через инвертор.

Основным элементом векторного магнитометра является СВЧ-генератор, частота которого определяется частотой ферромагнитного резонанса ЖИГ-резонатора, находящегося в его цепи обратной связи. Конструкции генераторов на ЖИГ-резонаторах (сферических или плёночных) известны и представлены в ряде работ, например, в [4 – 7]. Отличие представленного магнитометра заключается в использовании свойств ПДС в плёнках ЖИГ, приводящем к изменению частоты магнитоуправляемого СВЧ-генератора. Более подробно вопросы исследования доменных структур в плёнках ЖИГ представлены в работах [11 – 15].

В цепи обратной связи ГУМ находится ДР (рис. 3). Вблизи ДР находятся катушки индуктивности  $L1$  и  $L2$ , на которые поступают импульсы тока от генератора прямоугольных импульсов, причём перед одной из катушек включён инвертор, обеспечивающий формирование импульсов тока в катушках в противофазе. К выходу ГУМ подсоединён вход частотомера, который выполняет измерения частоты ГУМ при поступлении импульсов запуска частотомера. Используются коаксиально-



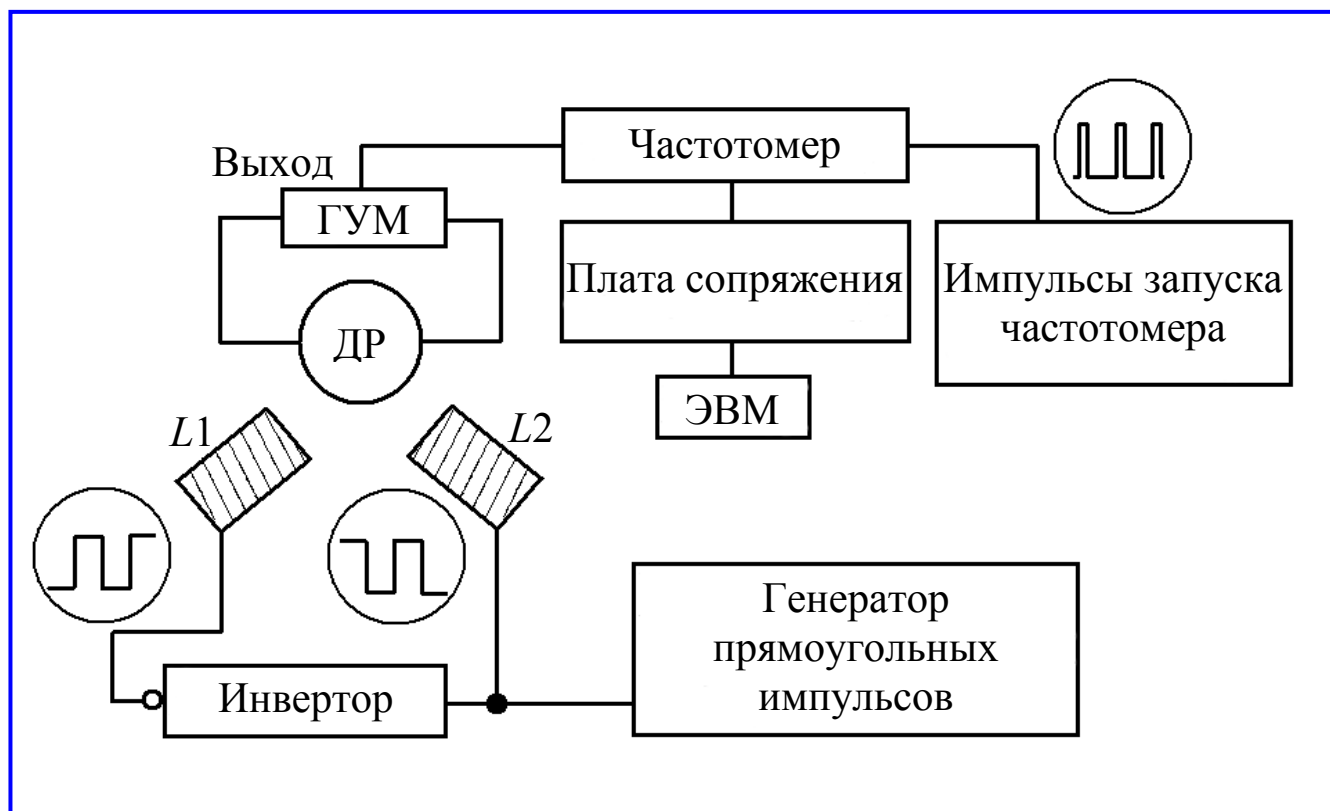


Рис. 3. Блок-схема двухкомпонентного магнитометра

микрорасщепленные переходы, методы расчёта которых представлены в [16]. С выхода частотомера измеренные значения частоты через плату сопряжения, выполняющую функции интерфейса, поступают для обработки в ЭВМ. С помощью программного обеспечения в ЭВМ производятся необходимые вычисления и определяются величина и направление полного вектора магнитной индукции  $B_0$  внешнего постоянного магнитного поля.

Магнитометр (рис. 3) работает следующим образом. Генератор прямоугольных импульсов с частотой  $\nu$  посылает импульсы тока на катушки индуктивности  $L1$  и  $L2$ . Инвертор преобразует уровни прямоугольных импульсов и, в результате, на катушки  $L1$  и  $L2$  импульсы приходят в противофазе. При длительности импульсов порядка 1 мс и индуктивности 1 мГн переходные процессы незначительны и не требуют дополнительной корректировки. При диаметре ДР порядка 0,5 мм, диаметре и длине катушек индуктивности ( $L1$ ,  $L2$ ) 0,75 мм и 1,5 мм, соответственно, в области ДР создаётся достаточно однородное магнитное поле величиной около 100 Гс. Таким образом, катушки индуктивности  $L1$  и  $L2$  поочередно создают в обла-

сти ДР магнитные поля, направленные вдоль первой и второй ОЛН. При этом полосовая доменная структура и вектор намагниченности изменяют свои направления в плоскости ДР на  $120^\circ$ . Эффективное взаимодействие ДР с микрорасщепленной линией передачи обеспечивается преобразователем индукции магнитного поля, конструкция которого показана, например, в [17].

Результирующее магнитное поле в области ДР будет определяться суммой векторов магнитной индукции внешнего (измеряемого) поля  $B_0$  и поля  $B_i$  от одной из катушек индуктивности ( $L1$  или  $L2$ ) (см. рис. 2):  $B = B_0 + B_i$ , где  $i = 1, 2$ .

Информация о величине магнитной индукции содержится в частоте ГУМ, которая задаётся частотой ферромагнитного резонанса в ДР и измеряется с помощью частотомера. Величина магнитной индукции связана с измеренной частотой простым соотношением:  $f = \gamma|B|$ , где  $\gamma$  – известная величина гиромагнитного отношения.

Импульсы запуска частотомера синхронизированы с частотой переключения направления магнитного поля  $\nu$ . Затем сигнал с выхода частотомера через необходимую плату сопряжения поступает для обработки в ЭВМ.

В заявляемом изобретении угол между компонентами внешнего магнитного поля  $B_1$ ,  $B_2$  составляет  $120^\circ$  и полный вектор магнитной индукции  $B_0$  находится путём их векторного суммирования (см. рис. 2).

Представленный магнитометр имеет ряд преимуществ по сравнению с известными решениями, описанными в [1 – 3]. Так, при определении положения объекта часто используется способ «пеленга», при котором несколько идентичных датчиков определяют азимутальные углы в направлении объекта. Затем находится точка пересечения этих направлений. Другой подход основан на использовании одного датчика, который необходимо перемещать и повторно выполнять определение направления на ферросодержащий объект (или источник поля). Традиционные подходы при решении задач обнаружения местоположения объектов, следовательно, должны использовать либо идентичные датчики, либо один, который необходимо перемещать.

Решение, представленное в статье, объединяет оба подхода. Использование свойств ПДС [15], позволяющих изменять направление вектора намагниченности ДР, создаёт возможности для пространственного пеленга. Использование одного и того же ГУМ решает проблему идентичности датчиков.

Магнитометр может использоваться для решения задач навигации, обнаружения и диагностики ферросодержащих тел, датчиков магнитных полей и пр.

### Литература

1. Отечественные и зарубежные патенты по транзисторам, магнитотранзисторам и ЖИГ-генераторам за 1992 – 2003 годы / А. А. Игнатъев, А. В. Ляшенко, В. А. Костяков [и др.] // Гетеромагнитная микроэлектроника. – Саратов : Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, 2004. – № 1. – С. 162 – 170.
2. Патентные исследования по разработке высокочастотных транзисторов, магнитотранзисторов и устройств на их основе / А. А. Игнатъев, Л. Л. Страхова, С. П. Кудрявцева [и др.] // Гетеромагнитная микроэлектроника. – Саратов : Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, 2008. – № 3. – С. 85 – 104.
3. Анализ патентной информации характеристик магнитометрических датчиков из магниторезистивных и полупроводниковых материалов, датчиков генераторного типа, микрорезонаторных датчиков и магнитометров на их основе / С. П. Кудрявцева, Л. А. Романченко, Л. Л. Страхова [и др.] // Гетеромагнитная микроэлектроника. – Саратов : Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, 2005. – № 2. – С. 177 – 193.
4. Исследование интегральных магнитоуправляемых генераторов в СВЧ-диапазоне частот / А. Л. Хвалин, А. В. Васильев, А. А. Игнатъев [и др.] // Вопросы электро-механики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2010. – Т. 114. – № 1. – С. 51 – 55.
5. Экспериментальные исследования гибридного интегрального магнитоуправляемого генератора / А. Л. Хвалин, Л. С. Сотов, С. В. Овчинников [и др.] // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2009. – № 11. – С. 42 – 44.
6. Расчёт характеристик интегрального магнитоуправляемого генератора в диапазоне частот 26,0 – 37,5 ГГц / А. Л. Хвалин, Л. С. Сотов, А. В. Васильев // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2010. – № 11. – С. 47 – 49.
7. Первичный преобразователь на основе ЖИГ-генератора для измерения сильных магнитных полей / А. Л. Хвалин, С. В. Овчинников, Л. С. Сотов [и др.] // Датчики и системы. – 2009. – № 10. – С. 57 – 58.
8. Овчинников С. В., Сотов Л. С. Методика оценки чувствительности первичного преобразователя для датчика вибраций на основе СВЧ-феррорезонансного автогенератора / С. В. Овчинников, Л. С. Сотов // Гетеромагнитная микроэлектроника. – Саратов : Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, 2011. – № 10. – С. 51 – 61.
9. Пат. RU 2472182 Российская Федерация Устройство обнаружения электропроводящих объектов на базе датчиков магнитного поля с частотным выходом / Л. С. Сотов, А. Л. Хвалин. – Опубл 20.05.2011.
10. Смит Я., Вейн Х. Ферриты. Физические свойства и практические применения / Я. Смит, Х. Вейн. – М. : Изд-во иностр. лит-ры, 1962. – 504 с.
11. Коваленко М. Л., Сотов Л. С. Исследование двухдоменной модели сферического микрорезонатора на основе железо-иттриевого граната в ненасыщенном режиме / М. Л. Коваленко, Л. С. Сотов // Гетеромагнитная микроэлектроника. – Саратов : Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, 2005. – № 2. – С. 30 – 53.
12. Хвалин А. Л. Метод поверхностной магнитной проницаемости в решении задачи анализа слоистых ферритосодержащих структур // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2009. – № 4. – С. 25 – 30.
13. Хвалин А. Л. Дисперсионные соотношения для слоистых ферритосодержащих структур в прямоугольном волноводе // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2010. – № 1. – С. 73 – 80.
14. Хвалин А. Л. Моделирование магнитной микро-структуры полосовых доменов в пленках ЖИГ// Гетеромагнитная микроэлектроника. 2011. – № 11. – С. 4 – 14.
15. Хвалин А.Л., Солопов А.А., Ляшенко А.В. Исследование СВЧ-резонаторов на эпитаксиальных структурах ЖИГ с учётом доменной структуры// Гетеромагнитная

микроэлектроника. – Саратов : Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, 2012. № 12. – С.4 – 11.

16. Kats В.М., Meschanov V.P., Khvalin A.L. Synthesis of superwide-band matching adapters in round coaxial lines.

IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2001. – Т. 49. – № 3. – С. 575 – 579.

17. Хвалин А.Л., Сотов Л.С. Полосовой ферритовый фильтр сверхвысоких частот патент на изобретение RUS 2393594 12.05.2009.

*Поступило в редакцию 19.02.2014*

*Александр Львович Хвалин, канд. техн. наук, доцент,  
e-mail: Khvalin63@mail.ru, т. (845) 278-44-55.*