

УДК 621.865.8

ПАРАМЕТРЫ МИНИАТЮРНОГО ЭЛЕМЕНТА ХОЛЛА С КОНЦЕНТРАТОРАМИ МАГНИТНОГО ПОТОКА КАК ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКА

Ярмолович В.А.

НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, г. Минск, Республика Беларусь

Приведены результаты проектирования высокочувствительных сенсоров квазистатических магнитных полей на основе миниатюрных элементов Холла с ферромагнитными концентраторами магнитного потока. Определены параметры такого сенсора как четырехполюсника. (E-mail: 5100519@tut.by)

Ключевые слова: элемент Холла, концентратор магнитного потока, четырехполюсник.

Введение

Проблема создания микроэлектронных сенсоров или датчиков электромагнитных полей (ЭМП), позволяющих вести контроль квазистатических магнитных полей в диапазоне амплитуд от 0,01 мкТл до 2 мТл (уровень слабых полей), приобрела дополнительную актуальность в конце 1990-х годов, когда многими исследователями было установлено, что, например, ЭМП сверхдлинного диапазона 0,001–100 Гц эффективно воздействуют на мозг человека и сердце, а ЭМП диапазона 100–1000 Гц – на мышцы.

Для регистрации слабых квазистатических магнитных полей стали использовать феррозонды, которые не могут быть изготовлены групповыми методами микроэлектроники и являются индивидуальными изделиями, причем со сложной схемой регистрации гармоник и обработки сигнала, а также СКВИДы (от англ. Superconducting Quantum Interference Device – сверхпроводящий квантовый магнитометр), для функционирования которых требуются очень низкие температуры. Вследствие низкой магнитной чувствительности современных пленочных датчиков Холла их прямое применение для регистрации слабых магнитных полей является неэффективным. Например, элемент Холла из лучшего материала – полупроводниковой эпитаксиальной пленки *n*-InSb обладает чувствительностью 300–500 мкВ/мТл при размерах чувствительной области $0,1 \times 0,1 \times 0,003$ мм [1]; нижний порог регистрации величины ин-

дукции магнитного поля в зависимости от качества применяемой электроники составляет не менее 0,01–0,1 мТл. Использование пленок широкозонных полупроводников, например, легированного GaAs позволяет повысить чувствительность в 2–3 раза, но и возрастает временная нестабильность и уровень шумов. Значительно большей магнитной чувствительностью обладают полупроводниковые магниторезисторы на основе гигантского магниторезистивного эффекта. Например, германиевый магниторезистор с размерами чувствительной области $8 \times 0,6 \times 0,2$ мм при токе питания 3 мА имеет чувствительность 50 мВ/мТл. Однако, кроме больших размеров он имеет узкий частотный диапазон измеряемых сигналов – примерно 0–1 кГц и значительный уровень шумов. Относительно высокая магнитная чувствительность магнитодиода 5–10 В/Тл реализуется только в сочетании с подмагничивающим полем $B \approx 0,3$ Тл, что неприемлемо использовать при регистрации слабых магнитных полей.

Значительно лучшей магнитной чувствительностью среди магнитотранзисторов обладают двухколлекторные магнитотранзисторы с вертикальными коллекторами. Современные магнитотранзисторы изготавливаются многоколлекторными. Спектральная плотность шума в них зависит от частоты и при низких частотах достигает максимума, но не превышает 1–5 мкТл в зависимости от типа транзистора. Пермаллоевые тонкопленочные магниторезистивные элементы обладают чувствительно-

стью порядка 10 В/Тл, и в полосе частот 1 МГц при комнатной температуре отношение ЭДС сигнала к ЭДС шума (теплового) соответствует примерно 97 дБ. Пермаллоевые магниточувствительные элементы, функционирующие на планарном эффекте Холла, при уровне собственных шумов в эквиваленте 0,1 мкТл имеют чувствительность в слабых полях приблизительно равную 10 В/Тл [2], что в 20 раз превышает чувствительность классического элемента Холла из гетероструктуры $n\text{-InSb-i-GaAs}$, однако они обладают гистерезисом.

В мировой практике сейчас формируется тенденция использования ферромагнитных концентраторов магнитного потока для повышения магнитной чувствительности классических элементов Холла [3], в том числе в плоском исполнении [4], что позволяет использовать элементы Холла для регистрации слабых магнитных полей. Целью настоящей работы являлось создание принципиально новых сенсоров для измерения слабых магнитных полей, обладающих высокой магнитной чувствительностью, на 2–3 порядка превышающей среднестатистическую магнитную чувствительность классического элемента Холла, без ухудшения шумовых характеристик и временной стабильности, используя явление концентрации магнитного потока магнитомягкими ферромагнитными телами осесимметричных геометрических форм с заостренными наконечниками

Состояние проблемы проектирования высокочувствительных сенсоров и полученные результаты ее решения

В настоящее время наибольшее распространение получили магнитомягкие концентраторы, выполненные в виде осесимметричных фигур (длинные стержни, в том числе конусообразные или с закруглением и др.), а также плоские концентраторы магнитного потока. Дилемма создания микроэлектронных сенсоров квазистатических магнитных полей с ферромагнитными концентраторами заключается в значительном уменьшении коэффициента усиления магнитного потока k внешнего магнитного поля B с уменьшением геометрической длины концентраторов.

Известно, что коэффициент усиления магнитной индукции k , определяемый как отношение индукции магнитного поля в месте расположения элемента Холла B^* к индукции внешнего однородного магнитного поля B , в которое

поместили датчик, сильно зависит в первую очередь от величины зазора и длины концентратора и в общем случае при больших B коэффициент k становится функцией от B :

$$k = B^*/B. \quad (1)$$

Так, в работе [5] достигнут максимальный коэффициент усиления магнитного потока $k = 404$ при длине концентраторов $L = 100$ мм. При $L = 30$ мм он составлял 177. В настоящем сообщении использовался сверхтонкий миниатюрный элемент Холла, выполненный на основе гетероэпитаксиальной структуры $n\text{-InSb-i-GaAs}$ с толщиной в сборе менее 100 мкм, что позволило увеличить k до 1006 при зазоре $2D = 100$ мкм (при $L = 30$ мм $k = 355$). В основу проектирования сенсора магнитного поля взята конструкция, приведенная на рисунке 1, в которой миниатюрный элемент Холла размещался в зазоре заостренных ферромагнитных стержней с величиной угла при вершине конуса $2\omega = (35\text{--}45)^\circ$.

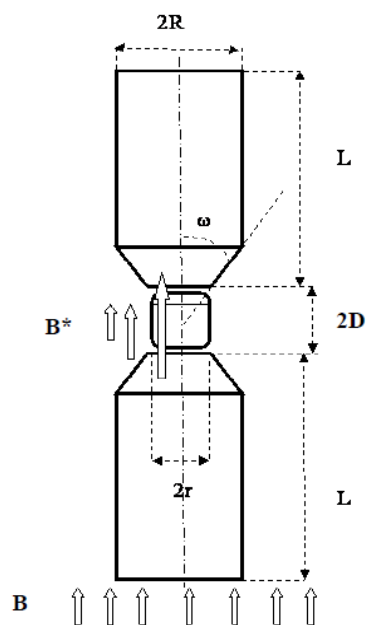


Рисунок 1 – Элемент Холла с концентраторами магнитного потока

Поперечные размеры кристалла Холла 300×300 мкм, область перекрестия пленочного элемента в форме квадрата 30×30 мкм, толщина пленки $n\text{-InSb}$ на полуизолирующем арсениде галлия равна 3 мкм. Уменьшение толщины d элемента Холла осуществлялось механическим шлифованием подложки из $i\text{-GaAs}$ до толщины менее 70 мкм с дальнейшей привар-

кой золотого микропровода диаметром 20 мкм к контактными площадкам элемента Холла. При этом элемент Холла устанавливается на меньшем основании конуса с большой точностью (операция выполняется под микроскопом МБС-3), а диаметр меньшего основания конуса равен или незначительно превосходит длину перекрестия пленочного элемента Холла. Концентраторы магнитного потока выполнены из материала с высокой индукцией магнитного насыщения – супермендюр, что позволило увеличить максимальное измеряемое значение индукции магнитного поля с величины 5,5 мТл (для ферритовых концентраторов) до 19,1 мТл (при $L = 10$ мм). Данный тип сенсоров разрабатывался для использования в малых космических аппаратах и являлся эксклюзивным изделием, требовал ручной сборки. Значения коэффициента усиления магнитного потока k приведены в таблице. Для широкого использования сенсоров, например, при геомагнитных измерениях достаточно использовать более миниатюрные концентраторы магнитного потока с $k = 20$, при этом сложность сборки изделия значительно снижается, и сборка может быть автоматизирована.

Таблица

Значения коэффициента усиления магнитного потока k

Геометрические параметры, длина концентратора L	Значение k	
	Из [5], материал концентратора (Steel1117), или высокопроницаемый феррит	Материал концентратора (супермендюр)
$L = 100$ мм	404	1006
$L = 80$ мм	–	820
$L = 60$ мм	–	635
$L = 30$ мм	177	355
$L = 10$ мм	–	132

Коэффициент усиления k магнитного потока (или индукции магнитного поля) является главной характеристикой концентратора. Основной задачей при проектировании концен-

траторов магнитного потока любой конфигурации является достижение высоких значений k при миниатюризации геометрических размеров концентратора. При этом к концентратору предъявляются следующие основные требования [5]:

- значение коэффициента усиления k в слабых полях стремиться к максимуму, а геометрические размеры – к минимуму;
- величина индукции магнитного поля ($k \cdot B$) практически не изменяется в месте расположения элемента Холла, т.е. все части элемента Холла находятся в однородном поле, или, по крайней мере, это выполняется для магниточувствительной области элемента Холла, т.е. перекрестия;
- высокая воспроизводимость усиления магнитного потока, что требует применения материалов с низкой коэрцитивной силой, а также с высокой начальной магнитной проницаемостью, обладающей повышенной временной стабильностью;
- высокий порог величины индукции внешнего магнитного поля, при котором концентратор входит в режим насыщения;
- при функционировании в переменных электромагнитных полях – широкий частотный диапазон.

Естественно, что подобрать единственный материал и миниатюрные размеры на все случаи использования концентраторов в сенсорах магнитных полей крайне затруднительно, а вот установить взаимосвязи и влияния геометрических размеров, конфигурации и магнитных свойств на прохождение магнитного потока по концентратору представляется важной задачей для понимания принципов проектирования и оптимизации сенсоров.

В связи с вышеизложенным, разработана физическая модель элемента Холла с концентраторами магнитного потока как четырехполюсника. Обозначим высоту пленочного элемента Холла d , а расстояние между концентраторами магнитного потока – $2D$. К выходным клеммам ЭДС Холла может быть подключена электрическая нагрузка R_L .

При заданной магнитной индукции B внутри пленки потенциалы U_1 и U_2 в магниточувствительном элементе Холла являются линейными функциями токов J_1 и J_2 , так что для четырехполюсника (рисунок 2) справедливы следующие зависимости, записанные с использованием Z параметров [6]:

$$\begin{aligned} U_1 &= Z_{11}J_1 + Z_{12}J_2, \\ U_2 &= Z_{21}J_1 + Z_{22}J_2. \end{aligned} \quad (2)$$

Стрелки на рисунке 2 указывают положительные направления тока и разности потенциалов. Так как полное сопротивление Z не содержит реактивной составляющей, то уравнения могут быть записаны с использованием активного электросопротивления R_{ij} . С учетом того, что четырехполюсник считается необратимым, выражения (2) можно записать, аналогично, как и для обыкновенного датчика Холла [7], при этом из (1) $B^* = k \cdot B$.

$$\begin{aligned} U_1 &= R_{11}(k \cdot B)J_1 - R_{12}(k \cdot B)J_2, \\ U_2 &= R_{21}(k \cdot B)J_1 + R_{22}(k \cdot B)J_2, \end{aligned} \quad (3)$$

где все коэффициенты R_{ij} положительны и являются функциями магнитной индукции $k \cdot B$ в зазоре магнитомягкого концентратора магнитного потока. Эти коэффициенты имеют одинаковую размерность [Ом] и простой физический смысл: $R_{11} = U_1/J_1$ (при $J_2 = 0$) – входное сопротивление ненагруженного четырехполюсника; $R_{22} = U_2/J_2$ (при $J_1 = 0$) – выходное сопротивление при разомкнутом входе; $R_{21} = U_2/J_1$ (при $J_2 = 0$) – чувствительность четырехполюсника к магнитному полю в режиме холостого хода.

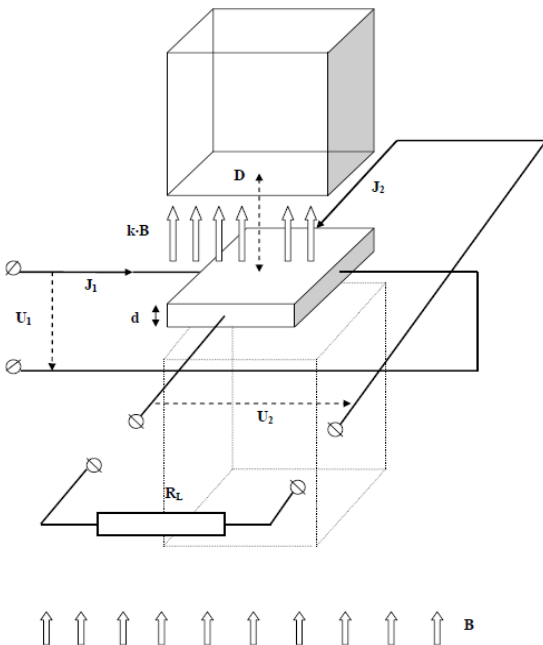


Рисунок 2 – Четырехполюсник

Как и для обычного элемента Холла, изменение полярности магнитного поля ведет к из-

менению знаков R_{12} и R_{21} , т.е. выполняются условия:

$$\begin{aligned} R_{12}(-k \cdot B) &= -R_{12}(k \cdot B), \\ R_{21}(-k \cdot B) &= -R_{21}(k \cdot B). \end{aligned} \quad (4)$$

Из экспериментов следует, что в интервале внешних магнитных полей $B \leq 3$ мТл для датчиков Холла из антимонида индия и плоских концентраторов магнитного потока с характерными значениями k в интервале 1–100 единиц R_{11} и R_{22} слабо зависят от B . Их относительные изменения не превышают 3%. Учитывая, что $R_{12} \approx R_{21} \ll R_{11} \approx R_{22}$, $R_{11}(B)$ и $R_{22}(B)$ можно заменить их значениями при $B = 0$, а именно $R_{11}(0)$ и $R_{22}(0)$:

$$\begin{aligned} R_{11}(k \cdot B) &= R_{11}(0), \\ R_{22}(k \cdot B) &= R_{22}(0). \end{aligned} \quad (5)$$

Таким образом, система (3), дополненная зависимостями (1), (4) и (5), описывает параметры датчика Холла с плоскими концентраторами магнитного потока (при слабых внешних магнитных полях). При $k \cdot B \rightarrow Bs$, где Bs – индукция технического насыщения концентраторов магнитного потока, равенства (5) необходимо исключить из рассмотрения.

Если датчик выполнен строго симметричным, то $R_{11} = R_{22}$ и $R_{12}(k \cdot B) = R_{21}(k \cdot B)$. В реальном датчике эти условия могут выполняться лишь приближенно.

В четырехполюснике, описываемом зависимостями (3), имеет место взаимное влияние входной и выходной цепей друг на друга. При подключении к выходным клеммам справа нагрузки R_L зависимость к.п.д. $\eta(R_L)$ определяется так же, как и для обычного датчика Холла, функционирующего без концентраторов магнитного потока:

$$\eta(R_L) = U_2 J_2 / (U_1 J_1). \quad (6)$$

Зависимость к.п.д. от сопротивления нагрузки так же может быть рассчитана по формуле:

$$\eta(R_L) = R_{21}^2 R_L / [(R_{11} R_{22} + R_{12} R_{21} + R_{11} \cdot R_L)(R_{22} + R_L)]. \quad (7)$$

Важные параметры четырехполюсника – коэффициент передачи по току $\alpha = J_2/J_1$ и коэффициент передачи по напряжению $\beta = U_2/U_1$.

На рисунке 3 приведены соответственно зависимости $R_{11} = R_{22}$ и $R_{12} = R_{21}$ от индукции внешнего магнитного поля B при $k = 20$ для полупроводникового элемента Холла из InSb при толщине эпитаксиальной пленки InSb 7,2 мкм ($J_1 = 50$ мА).

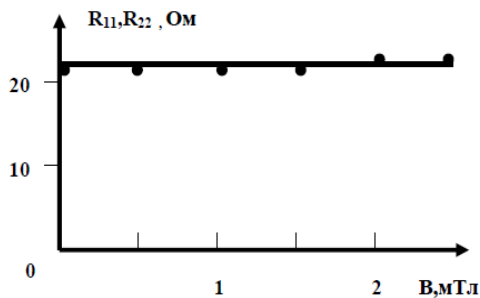


Рисунок 3 – Экспериментальная зависимость коэффициентов R_{11} , R_{22} от величины индукции внешнего магнитного поля B

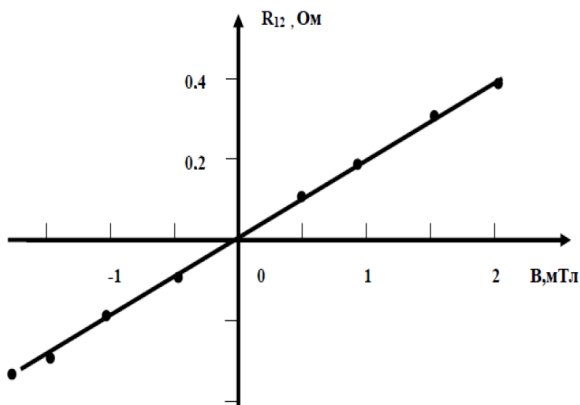


Рисунок 4 – Экспериментальная зависимость коэффициента R_{12} от величины индукции внешнего магнитного поля B

Коэффициент передачи по току α можно найти по формуле:

$$\alpha = J_2/J_1 = -R_{21}/(R_{22} + R_L). \quad (8)$$

Коэффициент передачи по напряжению β можно найти по формуле:

$$\beta = U_2/U_1 = -R_{21}R_L/(R_{11}R_{22} + R_{12}R_{21} + R_{11}R_L). \quad (9)$$

Зависимость к.п.д. четырехполосника от электросопротивления нагрузки, точнее от отношения R_L/R_{22} , приведена на рисунке 5.

На рисунках 6 и 7 изображены соответственно зависимости коэффициентов передачи по току α и по напряжению β от отношения

R_L/R_{22} при $k = 20$ для полупроводникового датчик Холла из InSb при толщине пленки 7,2 мкм ($J_1 = 50$ мА).

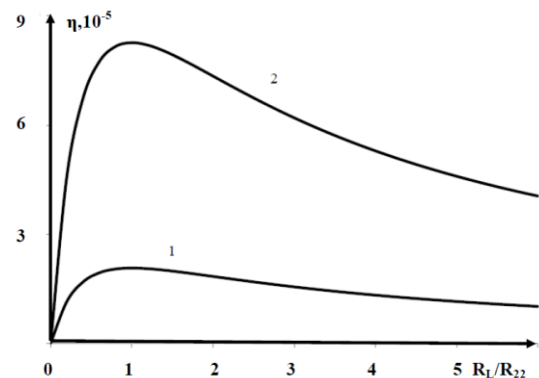


Рисунок 5 – Зависимость η от отношения R_L/R_{22} при $k = 20$ для полупроводникового элемента Холла из InSb при толщине пленки 7,2 мкм; $J_1 = 50$ мА ($B = 1$ мТл – линия 1, $B = 2$ мТл – линия 2)

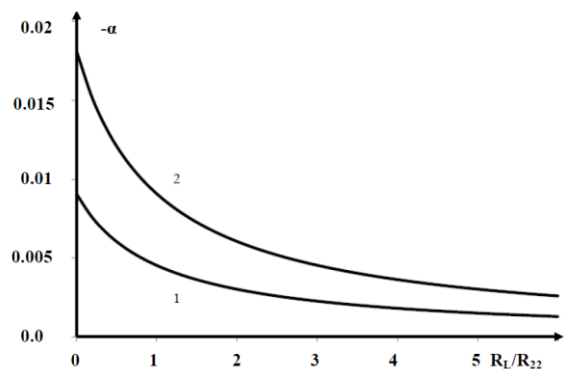


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента передачи по току α от отношения R_L/R_{22} при $k = 20$ для полупроводникового датчик Холла из InSb при толщине пленки 7,2 мкм; $J_1 = 50$ мА ($B = 1$ мТл – линия 1, $B = 2$ мТл – линия 2)

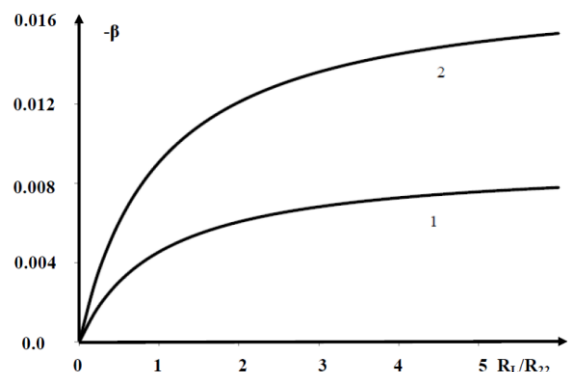


Рисунок 7 – Зависимость коэффициента передачи по напряжению β от отношения R_L/R_{22} при $k = 20$ для полупроводникового датчик Холла из InSb при толщине пленки 7,2 мкм; $J_1 = 50$ мА ($B = 1$ мТл – линия 1, $B = 2$ мТл – линия 2)

По абсолютной величине коэффициент β увеличивается с ростом электросопротивления нагрузки R_L , а коэффициент α уменьшается. Так как $\eta = \alpha \cdot \beta$, то линия, описывающая зависимость к.п.д. $\eta(R_L)$ характеризуется максимумом.

Из рисунков 5–7 следует, что с увеличением внешнего магнитного поля наблюдается рост по абсолютной величине параметров четырехполюсника η , α , β .

Таким образом, предложенная система математических выражений (2)–(9) адекватно описывает параметры элемента Холла с концентраторами магнитного потока как четырехполюсника.

Заключение

1. Впервые изготовлены высокочувствительные магнитные сенсоры на основе элементов Холла с концентраторами магнитного потока, имеющими коэффициент усиления магнитного потока k свыше 1000 при длине концентратора $L = 100$ мм.

2. Показано, что использование явления концентрации магнитного потока магнитомягкими ферромагнитными телами осесимметричных геометрических форм с заостренными наконечниками позволяет разработать принципиально новые сенсоры для измерения слабых магнитных полей, обладающие магнитной чувствительностью, превышающей среднестатистическую магнитную чувствительность классического элемента Холла на 2–3 порядка.

3. Разработана физическая модель и предложена система математических зависимостей, которая адекватно описывает основные параметры элемента Холла с концентраторами маг-

нитного потока как четырехполюсника. В качестве примера использовались миниатюрные концентраторы магнитного потока с $k = 20$.

Список использованных источников

1. Прокошин, В.И. Новые методы контроля с помощью прецизионных механоэлектрических микропреобразователей / В.И. Прокошин, А.П. Драпезо, В.А. Ярмолович // Наука и инновации. – 2008. – № 11. – С. 69–71.
2. Драпезо, А.П. Нанотолщинные детекторы слабых магнитных полей из пленок пермаллоев / А.П. Драпезо, В.И. Прокошин, В.А. Ярмолович // Сб. докладов Межд. научн. конф. ФТТ-2005 Актуальные проблемы физики твердого тела. 26–28 октября, 2005. – Минск. – Т. 2. – С. 473–475.
3. Integrated sensor having a magnetic flux concentrator // Patent US 2006175674, Publication date 2006-08-10.
4. Predrag, M. Design of planar magnetic concentrators for high sensitivity Hall devices / M. Predrag [et. al] // Sensors and Actuators A: Physical. – Vol. 97–98, 1 April 2002. – P. 10–14.
5. Буслов, И. Магнитомягкие концентраторы магнитного потока для сенсоров слабых магнитных полей / И. Буслов, В. Бауткин, А.П. Драпезо, В.А. Ярмолович // Электроника. – 2011. – № 1. – С. 31–35.
6. Вайсс, Г. Физика гальваномагнитных полупроводниковых приборов / Г. Вайсс. – М., Энергия, 1974. – 384 с.
7. Анищик, В.М. Исследование параметров датчика, функционирующего на планарном эффекте Холла, как четырехполюсника / В.М. Анищик, В.А. Ярмолович // Вестник БГУ. – 1998. – Сер. 1. – № 3. – С. 45–49.

Yarmolovich V.A.

Parameters of miniature Hall element with magnetic flow concentrators as quadripole

The results of designing of highly sensitive sensors of quasi-static magnetic fields on the basis of miniature Hall elements with ferromagnetic flux concentrators are presented. The parameters of the sensor such as a quadripole are evaluated. (E-mail: 5100519@tut.by)

Key words: Hall element, concentrator of magnetic flux, quadripole.

Поступила в редакцию 11.01.2013.