

## Основные Концептуальные Принципы Проектирования Сенсоров Слабых Магнитных Полей на Эффекте Холла

В.А. Ярмолович\*, Г. Шилагарди \*\*, В.И. Прокошин\*\*\*, А.П. Дранезо\*,  
Х.Цоохуу\*\*, Д.Тимурбатор\*\*, П. Тувшинтур\*\*

(\* Республика Беларусь, ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», \*\* Монголия, Монгольский национальный университет, \*\*\* Республика Беларусь, Белорусский республиканский фонд фундаментальных исследований)

### I. СОСТОЯНИЕ РАЗРАБОТКИ ПРОБЛЕМЫ

Проблема создания микроэлектронных сенсоров электромагнитных полей (ЭМП), позволяющих вести контроль трехмерных составляющих вектора индукции магнитного поля в диапазоне частот  $0 \leq f \leq 5$  МГц и амплитуд  $0,01 \mu\text{T} - 2 \text{ mT}$  (уровень слабых полей) приобрела дополнительную актуальность в конце 90-х годов, когда многими исследователями было установлено, что у животных и людей, длительно находившихся в ЭМП, напряженность которых превышала напряженность природных ЭМП, увеличивалась агрессивность, ухудшалось состояние иммунной системы, возрастала частота возникновения злокачественных опухолей, выявлялись признаки ускоренного старения [1], а также стали проводиться в военных целях исследования по воздействию на человека искусственно генерируемого электромагнитного излучения. 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, 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  $n - \text{InSb}$  обладает чувствительностью  $(300-500) \mu\text{V/mT}$  при размерах чувствительной области  $0,1 \times 0,1 \times 0,003 \text{ mm}$ ; нижний порог регистрации величины индукции магнитного поля в зависимости от качества применяемой

электроники составляет не менее  $(0,01 - 0,1 \text{ mT})$ , что явно недостаточно. Применение пленок широкозонных полупроводников, например легированных GaAs, позволяет повысить чувствительность в 2-3 раза, но при этом возрастает как временная нестабильность, так и уровень шумов.

Значительно большей магнитной чувствительностью обладают полупроводниковые магниторезисторы на основе ГМР-эффекта (гигантского магниторезистивного эффекта). Так, германиевый магниторезистор с размерами чувствительной области  $8 \times 0,6 \times 0,2 \text{ mm}$  при токе питания  $3 \text{ mA}$  имеет чувствительность  $50 \text{ mV/mT}$ . Кроме больших размеров, он имеет узкий частотный диапазон измеряемых сигналов - примерно  $(0-1) \text{ кГц}$  и значительный уровень шумов. Относительно высокая магнитная чувствительность магнитодиода  $(5-10) \text{ V/T}$  реализуется только в сочетании с подмагничивающим полем  $B_n \approx 0,3 \text{ T}$ , 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  $(1-5) \mu\text{T}$  в зависимости от типа транзистора. Пермаллоевые тонкопленочные магниторезистивные элементы обладают чувствительностью порядка  $10 \text{ V/T}$ , и в полосе частот  $1 \text{ МГц}$  при комнатной температуре отношение ЭДС сигнала к ЭДС шума (теплового) соответствует примерно  $97 \text{ дБ}$ . Пермаллоевые магниточувствительные элементы, разработанные авторами в ГО «Научно-практический центр НАНБ по материаловедению», функционирующие на планарном эффекте Холла при уровне собственных шумов в эквиваленте  $0,1 \mu\text{T}$  имеют чувствительность в слабых полях  $\approx 10 \text{ V/T}$  [2], что в 20 раз превышает

чувствительность классического элемента Холла из гетероструктуры  $n - \text{InSb} - i - \text{GaAs}$  (разработка этой же организации), 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.

## II. НАУЧНАЯ ИДЕЯ

Используя явление концентрации магнитного потока магнитомягкими ферромагнитными телами определенных геометрических форм можно разработать принципиально новые однокомпонентные сенсоры слабых магнитных полей, в том числе нанотолщинные, функционирующие на эффектах Холла как классическом, так и планарном. Они изготавливаются по групповой технологии микроэлектроники, и обладают высокой магнитной чувствительностью, которая превышает среднестатистическую магнитную чувствительность классического элемента Холла на два порядка (например, для миниатюрного элемента Холла из гетероструктуры  $n - \text{InSb} - i - \text{GaAs}$   $\gamma = 300 \text{ mV/T}$ ), без ухудшения шумовых характеристик и временной стабильности.

Увеличение магнитной чувствительности классического элемента Холла достигается за счет применения магнитомягких ферромагнитных концентраторов магнитного потока, которые целесообразно выполнять в виде осесимметричных фигур (длинные стержни, в том числе конусообразные или с закруглением и т.п.). Использование планарного эффекта Холла в сверхтонких (нанотолщинных) пленках, например, пермаллоев позволяет создать элементы, обычно в форме круга, с магнитной чувствительностью в 20 - 30 раз превышающей среднестатистическую магнитную чувствительность классического элемента Холла, причем с высокой стабильностью по времени. Другой важной особенностью нанотолщинных магниточувствительных элементов является возможность их встраивания в магнитопроводы без разрыва магнитных цепей, к примеру, при изготовлении сенсоров тока. Не менее ценным является их технологическая совместимость с ЦМД микросхемами. Дополнительные возможности

открываются при совместном использовании элементов, функционирующих на планарном эффекте Холла, и концентраторов магнитного потока, которые тоже могут быть выполнены нанотолщинными. Следовательно, изложенная идея позволяет стандартными методами микроэлектроники средней точности изготавливать сенсоры слабых магнитных полей с улучшенными техническими характеристиками.

## III. РАСЧЕТ КОНЦЕНТРАТОРОВ МАГНИТНОГО ПОТОКА ДЛЯ СЕНСОРОВ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

С помощью программы FEMM 4.0 [5] решалось уравнение Пуассона для векторного магнитного потенциала  $A$ , где  $\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A}$ , а  $\mathbf{B}$  – индукция магнитного поля. Для полного определения функции  $A$  использовалось условие  $\text{div } \mathbf{A} = 0$ , которое называется калибровкой Кулона. Уравнение, определяющее магнитные свойства материалов конструкции, записывалось в виде  $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} + \mathbf{B}_r$ , где  $\mu$  – магнитная проницаемость вещества, которая являлась функцией  $|\mathbf{B}|$ , т.е.  $1/\mu = f(|\mathbf{B}|)$ , что и выражает нелинейную связь между полями  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{H}$  вследствие насыщения магнитного потока (особенно в месте сужения магнитного потока). Здесь  $\mathbf{H}$  – напряженность магнитного поля. Для этой модели граничные условия выражались через векторный потенциал. Тангенциальная составляющая  $A=0$  на границе находящейся в бесконечности (т.е. достаточно удаленной), чтобы магнитную энергию можно было полагать равной нулю. На оси симметрии вращения накладывалось условие  $A=0$ , а в плоскостях магнитной и геометрической симметрии  $dA/dn = 0$ , т.е. линии потока перпендикулярны этим плоскостям. В случае, когда рассматриваемая область граничит с материалами, проницаемость которых можно считать большей, чем проницаемость внутренних материалов в 1000 раз, то нормальная составляющая  $A_n=0$ . Следует отметить, что для областей, обладающих симметрией вращения, как в нашем случае, условие калибровки Кулона  $\text{div } \mathbf{A} = 0$  выполняется автоматически.

Конечные элементы, используемые для дискретизации рассматриваемой области имели вид треугольников различных размеров, причем размеры увеличивались при приближении к границам модели. Общее количество точек, в которых осуществлялся расчет, составлял не менее 50 тысяч. Дискретизация выполнялась автоматически.

Постпроцессор решал систему линейных алгебраических уравнений таким образом, пока сходимость уравнений не уменьшалась до  $10^{-8}$ .

При расчете использовалась осесимметричная двумерная модель соленоида длиной 760 mm. Индукция магнитного поля внутри соленоида  $B_0$  моделировалась величиной тока обмотки. В отсутствие ферромагнитного концентратора неравномерность  $B_0$  в пределах длины 200 mm средней части соленоида не превышала 3,5 %, а вдоль радиуса -2%. Модель концентратора магнитного потока представляла собой два осесимметричных стержня, каждый из которых имел длину  $L$  и радиус  $R$ , разнесенных на небольшое расстояние  $2d$ . При расчетах использовались магнитные характеристики стали 45, что эквивалентно изготовлению концентраторов из стали 45. Расстояние  $2d$  ограничивалось толщиной классического пленочного элемента Холла с подложкой и в настоящее время не может быть менее 0,15 mm. Отношение величины

индукции магнитного поля  $B_n$  в середине зазора концентратора (место расположения элемента Холла) к величине индукции  $B_0$  соленоида представляет собой величину коэффициента усиления  $k$  магнитного потока (или индукции магнитного поля), и является главной характеристикой концентратора. Основной задачей при проектировании концентраторов магнитного потока любой конфигурации является достижение высоких значений  $k$  при заданных значениях геометрических размеров, которые необходимо миниатюризировать.

Расчет распределения индукции магнитного поля вдоль радиуса соленоида  $B_n(r)$  при  $L=100$  mm,  $2d=1$  mm,  $R=1$  mm,  $B_0=2.5$  mT представлен на рис.1, а значения коэффициента усиления  $k$  от геометрических размеров концентратора приведено в табл. 1 и 2. Таким образом, теоретически рассчитано, что при длине каждого из стержней 10 см и зазоре 0,15 mm можно достичь коэффициент усиления магнитного потока в ~400 раз.

Таблица 1. Зависимость  $k(d)$ 

Геометрический параметр, mm	L=100 2d=0.15	L=100 2d=0.25	L=100 2d=0.5	L=100 2d=1	L=100 2d=2	L=100 2d=4
k	404	204	120	66	33,6	15,0
$B_0$ , mT	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5

Таблица 2. Зависимость  $k(B_0)$ 

Геометрический параметр, mm	L=100 2d=0.15	L=100 2d=0.15	L=100 2d=0.15	L=100 2d=0.15	L=100 2d=0.15	L=100 2d=0.15
k	404	174	128	102	50	5
$B_0$ , mT	2,5	5,0	7,5	10,0	25,0	250

#### IV. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАНОТОЛЩИННОГО СЕНСОРА МАГНИТНОГО ПОЛЯ.

Сенсоры магнитного поля, функционирующие на планарном эффекте Холла, изготавливались из пленки пермаллоя состава 80%Ni20%Fe в соответствии с технологией, изложенной в [6]. Зависимость выходного сигнала  $U_x$  нанотолщинного элемента пермаллоя от индукции внешнего магнитного поля при ток питания 120 mA представлена на рис.2

Основные технические характеристики: Входное (выходное) сопротивление преобразователей Холла- (10 – 25) Ом.

Магнитная чувствительность  $\gamma_+$  и  $\gamma_-$  имеет гистерезис в магнитном поле до 2 mT, который можно учесть с помощью компьютерной обработки и ввести однозначную функцию магнитной чувствительности  $\gamma = (\gamma_+ + \gamma_-)/2$ , величина которой не мене (10-15) mV/mT.

Остаточное электрическое напряжение -не более 150  $\mu$ V.

Ток питания преобразователей (I-постоянный) составляет (50- 150)mA.

Габариты преобразователей Холла не превышают (толщина, ширина) 0,3x1,2 mm.

Габариты кристаллов Холла не превышают 0.5x0.5x0.15 mm.

Толщина пленки пермаллоя составляла (10 – 40) nm. Пленка выполнена одноосно анизотропной в плоскости подложки. Величина коэрцитивной силы пленки пермаллоя (150-197) A/m в зависимости от толщины пленки.

Температурный коэффициент магнитной чувствительности в диапазоне температур (77 -400) К - не более 0,01 % / К.

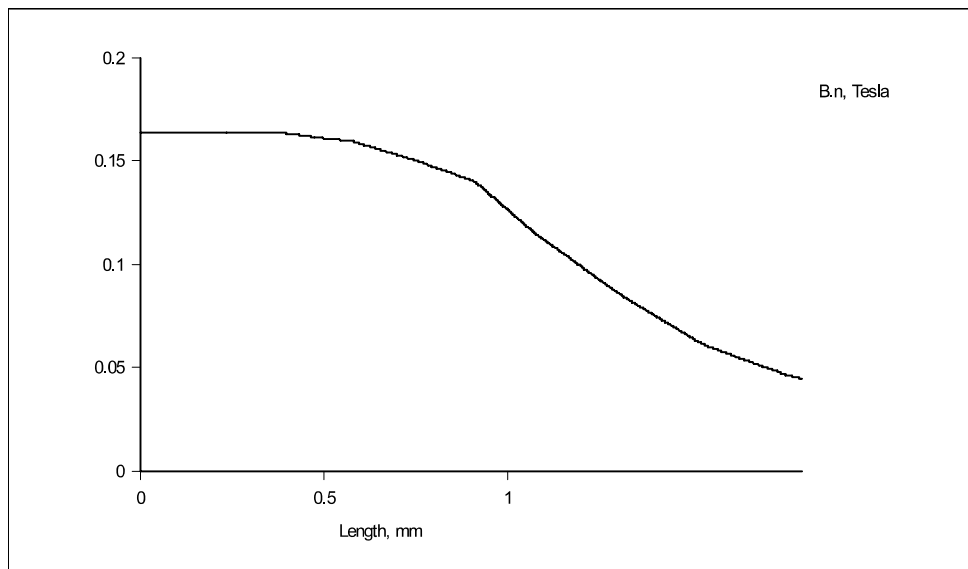


Рис.1

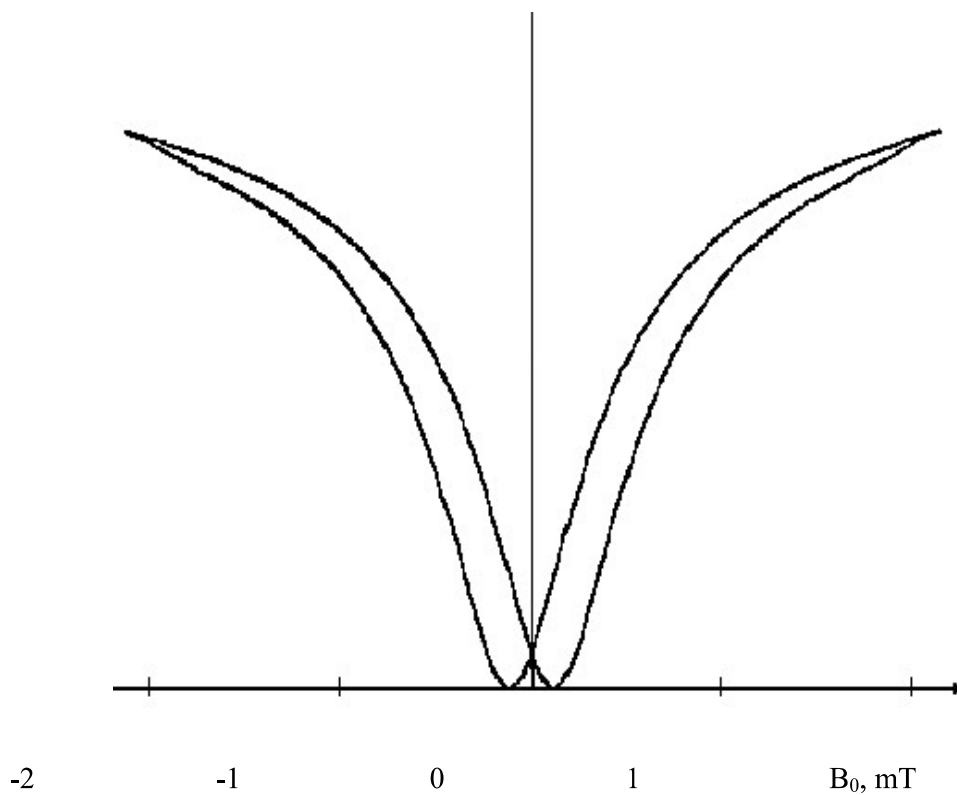


Рис.2

**ЛИТЕРАТКРА**

- [1]. Сайт в Интернетe <http://www.telepat-defence.com>
- [2]. Драпезо А. П., Прокошин В.И., Ярмолович В.А. Нанотолщинные детекторы слабых магнитных полей из пленок пермаллоев // Сб. докладов Межд. Научн. Конф. ФТТ-2005 Актуальные проблемы физики твердого тела. 26-28 октября, 2005г., 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., Drlja, Franck Vincent, Pierre-Andre Besse. Design of planar magnetic concentrators for high sensitivity Hall devices// Sensors and Actuators A: Physical , Vol. 97-98, 1 April 2002, P.10-14.
- [5]. Сайт в Интернетe :<http://femm.berlioz.de>
- [6]. Драпезо А.П., Ярмолович В.А. Особенности планарного эффекта Холла в тонких пленках пермаллоя // Вестник Фонда фундаментальных исследований, №3, 2005 г, с. 74-84.