

К. т. н. В. Р. СТЕМПИЦКИЙ, ДАО ДИНЬ ХА

Республика Беларусь, г. Минск, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

E-mail: vstem@bsuir.by, ha.dao.dinh@bsuir.by

## ПРИБОРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО СЕНСОРА С ИНТЕГРИРОВАННЫМ МАГНИТНЫМ КОНЦЕНТРАТОРОМ

*Представлены результаты исследования и оптимизации конструктивных и эксплуатационных характеристик на основе результатов приборно-технологического моделирования магниточувствительного сенсора с интегрированным магнитным концентратором дискообразной формы. Проанализировано влияние геометрических размеров, угла отклонения и используемого материала интегрированного магнитного концентратора на характеристики датчика Холла. Показано, что интеграция концентратора из ферромагнитного материала в конструкцию датчика магнитного поля обеспечивает значительное (до 10 раз) повышение коэффициента усиления магнитного потока, что позволяет применять исследуемые конструкции датчиков для детектирования слабых магнитных полей (от 0,01 мкТл до 2,0 мТл).*

*Ключевые слова: магниточувствительный сенсор, интегрированный магнитный концентратор, датчик Холла, ферромагнитный материал.*

В конструкции современных приборов микромагнитоэлектроники все чаще применяются концентраторы магнитного потока [1], с целью обеспечения возможности измерения слабых магнитных полей (от 0,01 мкТл до 2,0 мТл). Использование интегрированного магнитного концентратора (ИМК, англ. integrated magnetic concentrator) дискообразной формы из ферромагнитного материала позволяет для измерения трех компонентов магнитного поля разрабатывать сенсоры, обладающие более высокой магнитной чувствительностью по сравнению с традиционным датчиком Холла (ДХ) без ухудшения шумовых характеристик. В ряд важнейших вопросов, решаемых в рамках указанных научных направлений, входит задача разработки эффективных методов компьютерного моделирования и оптимизации конструктивных параметров ИМК в составе ДХ с использованием современных комплексов компьютерного проектирования в микроэлектронике.

Анализ научной литературы и патентных источников показывает, что в настоящее время наиболее эффективным решением для формирования активной области датчика Холла является применение пленок  $n$ -InSb, которые позволяют получить значения чувствительности до 500 мкВ/мТл и нижнего порога регистрации индукции магнитного поля не менее 0,01 мТл. Использование GaAs также обеспечивает повышение чувствительности в 2–3 раза по сравнению с приборами на основе кремния, однако не-

гативным фактором при этом является рост временной нестабильности и уровня шумов [2]. То есть использование ДХ традиционной конструкции для регистрации слабых магнитных полей является малоэффективным.

В [3] представлено описание ДХ, интегрированного со схемой обработки сигналов, где в качестве материала ИМК используется тонкопленочный сплав кобальта. При комнатной температуре чувствительность по току ДХ без концентратора составляет 240 В/(А·Тл), с концентратором — 2550 В/(А·Тл), при этом коэффициент усиления магнитного потока равен 10,5.

В [4] рассмотрены датчики магнитного поля, состоящие из датчика Холла, КМОП-микросхем, а также планарных ферромагнитных компонентов, изготовленных из мягкого аморфного сплава (англ. soft amorphous alloy), сформированного на поверхности кремниевой пластины на завершающем этапе производства (англ. post-processing production phase). ДХ с ферромагнитным магнитным концентратором обеспечивают увеличение коэффициента усиления магнитного потока на порядок и позволяют фиксировать параллельное поверхности кристалла магнитное поле.

В [5] описана конструкция InSb-датчика магнитного поля с интегрированным ферритовым концентратором и КМОП-ДХ, обладающим улучшенными шумовыми характеристиками. КМОП-технология обеспечивает возможность изготовления легко интегрируемого в цифро-

вые схемы ДХ и позволяет компенсировать зависимость эксплуатационных характеристик от температуры.

Настоящее исследование посвящено разработке интегрированного в датчик Холла дискообразного магнитного концентратора с высоким коэффициентом усиления магнитного потока, который можно использовать в системах трехмерной регистрации магнитного поля.

При проектировании концентратора необходимо стремиться к повышению усиления магнитного поля для увеличения выходного сигнала ДХ и уровня насыщенности для обеспечения широкого линейного рабочего диапазона, а также к снижению гистерезиса для уменьшения погрешности распределения магнитного поля. Первое требование обеспечивается оптимизацией геометрии ИМК, последнее – выбором материала, второй параметр связан как с материалом, так и с геометрией концентратора.

Рассмотрим влияние параметров материала ИМК и его геометрии на характеристики сенсорной системы.

### Требования к материалу для ИМК

Материал ИМК должен обладать низкой остаточной намагниченностью ( $B_r \approx 0$ ) и высоким уровнем насыщения ( $B_S = 2,8$  Тл), чему соответствуют, например, аморфный железоникелевый или железокобальтовый сплавы – супермендюр, сталь 1117, пермаллой и феррит [6] (табл. 1). Кроме того, материал ИМК должен обеспечивать формирование аморфной пленки с низкой коэрцитивной силой  $H_C$ , высокой температурой Кюри  $T_K$  и высокой магнитной проницаемостью  $\mu_H$ . Аморфное состояние позволяет получить высокие значения индукции магнитного насыщения  $B_S$  и линейность характеристик датчика.

Таблица 1

Магнитные свойства магнитомягких ферромагнитных материалов

Материал		$\mu_H$ , $10^3$	$H_C$	$T_K$ , $^{\circ}C$	$B_S$ , Тл
название	композиция				
Супермендюр	49% Со, 49% Fe, 2% V	0,8	0,15– 0,35	940	2,5– 2,8
Сталь 1117	0,17% С, 1,20% Mn	1,5	0,4– 0,6	750	2,1– 2,3
Феррит	50% Mn, 50% Zn	0,75– 15	0,04– 0,25	250	1,3– 1,5
Пермаллой	79% Ni, 17% Fe, 4% Mo	12– 100	0,02– 0,04	460	0,6– 0,8

### Конструкция сенсорной системы

Сенсорная система состоит из четырех датчиков Холла 2 и интегрированного магнитного концентратора 3, сформированных на кремниевой подложке 1 (рис. 1). Датчики Холла располагаются по краям ИМК перпендикулярно друг другу. Между ИМК и ДХ расположен слой диэлектрика 4 толщиной  $d$ . ИМК представляет собой диск, выполненный из супермендюра ( $B_S = 2,8$  Тл), с наружным диаметром  $D$  и внутренним  $D_1$ , толщиной  $l$  и краевым углом  $\theta$ , отсчитываемым от нормали к основанию дискового концентратора.

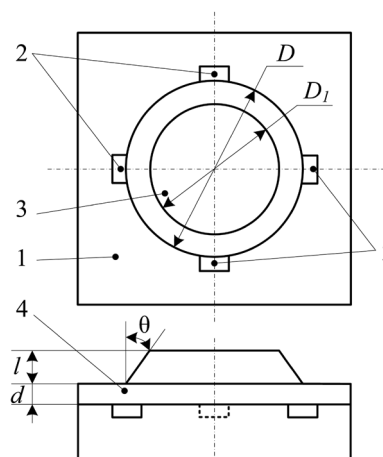


Рис. 1. Конструкция магниточувствительного сенсора с ИМК дискообразной формы: 1 – кремниевая подложка; 2 – датчики Холла; 3 – ИМК; 4 – диэлектрик

Использована кремниевая подложка  $p$ -типа (концентрация бора  $10^{15}$   $см^{-3}$ ) толщиной 5  $\mu m$  с активной областью  $n$ -типа (концентрация мышьяка  $5 \cdot 10^{16}$   $см^{-3}$ ) толщиной 1  $\mu m$ , длиной  $L = 60$   $\mu m$  и шириной  $W = 20$   $\mu m$ , чувствительность по току 280 В/(А·Тл) [7] ( $L$  и  $W$  – геометрические параметры датчика Холла).

### Влияние геометрических параметров ИМК на магнитные характеристики сенсорной системы

Компьютерное моделирование характеристик датчика Холла выполняли в среде программного комплекса Silvaco [8], параметры ИМК рассчитывались в программе femm [9].

Высокая магнитная проницаемость материала ИМК обеспечивает большую индукцию магнитного поля по его краям, что приводит к значительному усилению прилагаемого внешнего поля. То есть ИМК играет роль магнитного усилителя, а также влияет на отношения сигнал/шум и сигнал/смещение. При этом, однако, маг-

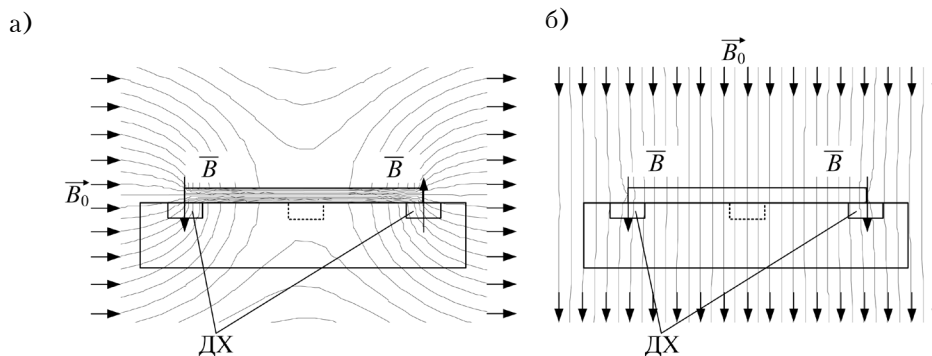


Рис. 2. Направление силовых линий магнитного поля в поперечном сечении сенсорного устройства на основе четырех ДХ и ИМК для параллельного (а) и перпендикулярного (б) магнитного поля

нитное усиление зависит не только от размера ИМК, но и от его формы.

Для оценки коэффициента усиления магнитного потока концентратора в составе сенсорного устройства с использованием программы *fehm* на основе решения уравнения Пуассона определялся векторный магнитный потенциал. Направление силовых линий магнитного поля в поперечном сечении сенсорного устройства на основе ДХ и ИМК для параллельного и для перпендикулярного магнитного поля представлено на **рис. 2**.

В датчике Холла с ИМК происходит локальное преобразование параллельного магнитного поля по краям концентратора в перпендикулярное. Наибольшее значение перпендикулярная составляющая магнитного поля имеет в области под краем концентратора, в которой расположены ДХ. Концентратор практически не оказывает влияние на магнитный поток, перпендикулярный поверхности трехмерного датчика магнитного поля (в этом случае коэффициент усиления магнитного потока  $G = 1$ ), о чем свидетельствует небольшое отклонение линий магнитного потока. То есть тонкий концентратор практически магнитопрозрачен при приложении магнитного поля перпендикулярно его поверхности.

Коэффициент усиления магнитного потока является главной характеристикой концентратора и определяется как

$$G = B / B_0,$$

где  $B$  — составляющая индукции магнитного поля в местах расположения датчиков Холла, перпендикулярная к поверхности ИМК.

На **рис. 3** представлены зависимости коэффициента усиления магнитного потока от размеров концентратора. Здесь видно, что каждому значению коэффициента  $G$  соответствует набор значений толщины  $l$  и диаметра  $D$ . При этом диапазон оптимальных значений  $G$  находится в пре-

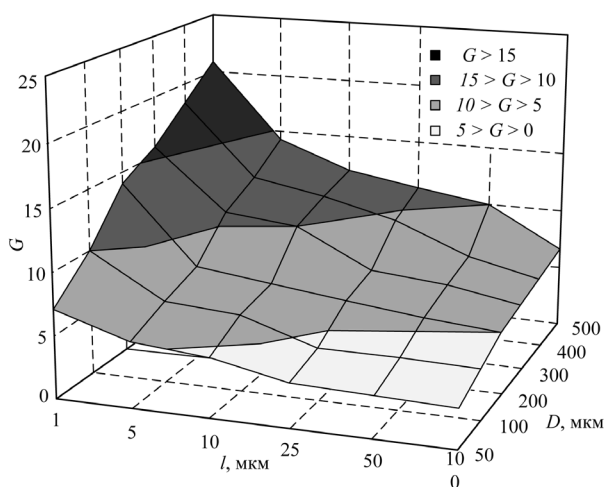


Рис. 3. Зависимость коэффициента усиления магнитного потока от размеров ИМК

делах от 10 до 15, поскольку обеспечивает эффективное использование площади кристалла.

В **табл. 2** приведены результаты моделирования, демонстрирующие изменение значения индукции магнитного поля по толщине диэлектрика для ИМК с размерами  $l = 10$  мкм и  $D = 200$  мкм и величине индукции внешнего магнитного поля  $B_0 = 1$  мТл.

Таблица 2  
Изменение индукции магнитного поля по толщине диэлектрика при  $l = 10$  мкм,  $D = 200$  мкм

$d$ , мкм	0	0,1	1	5	10	20
$B$ , мТл	9,66	6,94	5,12	2,68	1,99	1,55

Как видно, максимальное значение коэффициента  $G = 9,66$  достигается при  $d = 0$  мкм, что свидетельствует о необходимости минимизации расстояния между ИМК и датчиком Холла.

Еще одним важным фактором, влияющим на коэффициент усиления магнитного потока  $G$ , является угол наклона края ИМК  $\theta$ , отсчитываемого от нормали к основанию дискового кон-

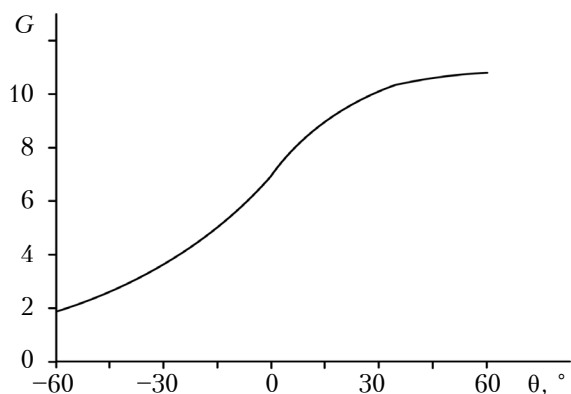


Рис. 4. Зависимость коэффициента усиления магнитного потока от угла наклона края ИМК

центратора (см. рис. 1). Анализ представленных на **рис. 4** результатов моделирования зависимости коэффициента усиления  $G$  от угла  $\theta$  указывает на то, что для исследуемой конструкции центратора ( $l = 10$  мкм,  $D = 200$  мкм) оптимальные значения коэффициента  $G$  достигаются при  $\theta = 45 - 60^\circ$ .

#### Влияние материала ИМК на магнитные характеристики сенсорной системы

На следующем этапе проведено исследование влияния параметров ферромагнитных материалов (см. табл. 1) на коэффициент усиления магнитного потока  $G$ . На **рис. 5** представлены зависимости составляющей индукции магнитного поля  $B$  по краям ИМК от напряженности магнитного поля  $H$  для различных материалов [6]. Анализ зависимости указывает на то, что наибольшее значение коэффициента  $G$  обеспечивает супермендюр.

На **рис. 6** представлены зависимости коэффициента усиления магнитного потока  $G$ , приведенного к его значению при  $B_0 = 1,0$  мТл, от

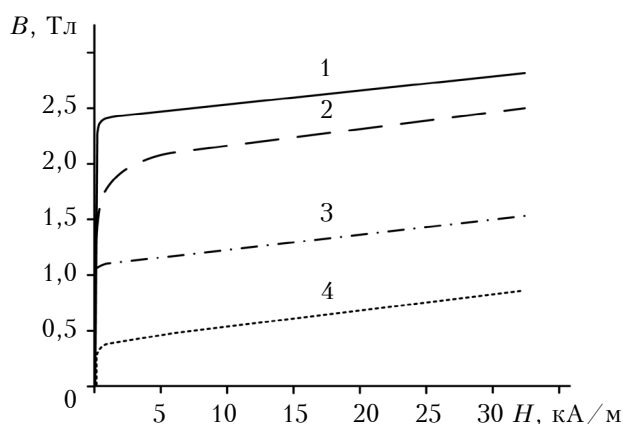


Рис. 5. Зависимость составляющей индукции магнитного поля  $B$  по краям ИМК от напряженности магнитного поля  $H$  для различных материалов:

1 – супермендюр; 2 – сталь 1117; 3 – пермаллой; 4 – феррит

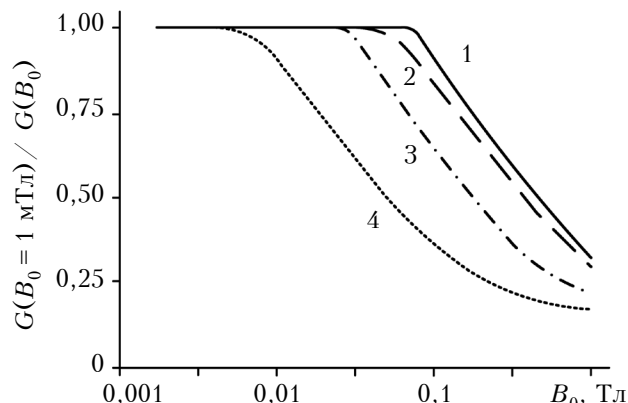


Рис. 6. Зависимость относительной величины коэффициента усиления от индукции внешнего магнитного поля  $B_0$  для различных материалов:

1 – супермендюр; 2 – сталь 1117; 3 – пермаллой; 4 – феррит

индукции внешнего магнитного поля  $B_0$  для различных материалов.

Результаты моделирования показали, что коэффициент усиления  $G$  постоянен только при небольших значениях внешнего магнитного поля  $B_0$ . При этом максимальные значения  $B_0$ , при которых центратор может выполнять его усиление, зависят от материала, они составили 120, 85, 55 и 10 мТл для супермендюра, стали 1117, пермаллоя и феррита соответственно. Дальнейшее увеличение внешнего магнитного поля  $B_0$  приводит к уменьшению коэффициента усиления  $G$ , что соответствует состоянию насыщения центратора.

#### Трехмерный магниточувствительный сенсор

Датчик Холла фиксирует только одну составляющую магнитного поля, направленную перпендикулярно поверхности чипа. Трехмерный датчик магнитного поля [10] обеспечивает возможность одновременного измерения составляющих магнитного поля  $B_x, B_y, B_z$  по осям  $X, Y, Z$  (**рис. 7**), что дает целостное представление о магнитном поле.

Две плоские компоненты магнитного поля  $B_x$  и  $B_y$  измеряются путем вычитания холловских напряжений двух противоположных ДХ. Для третьего компонента перпендикулярного поля  $B_z$  используются ДХ, но их выходное напряжение добавляется как в обычном ДХ (без ИМК). Это дает напряжение  $V_z$ , пропорциональное компоненте перпендикулярного магнитного поля  $B_z$ . Затем три сигнала  $V_x, V_y$  и  $V_z$  подаются на системы их обработки.

На **рис. 8, а** представлены зависимости напряжения Холла от угла отклонения магнитного потока  $\alpha$  (см. рис. 7) при индукции внешнего магнитного поля, параллельного поверхности сенсорного устройства,  $B_0 = 100$  мТл. Здесь вид-

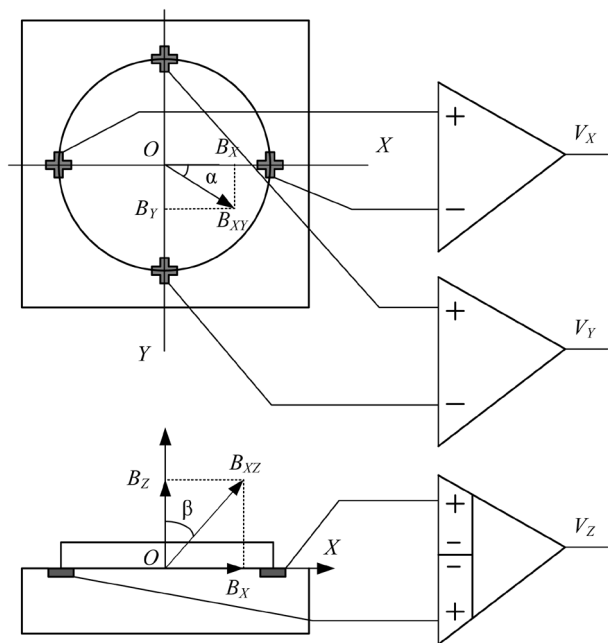


Рис. 7. Схема для вычисления трех составляющих магнитного поля  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$

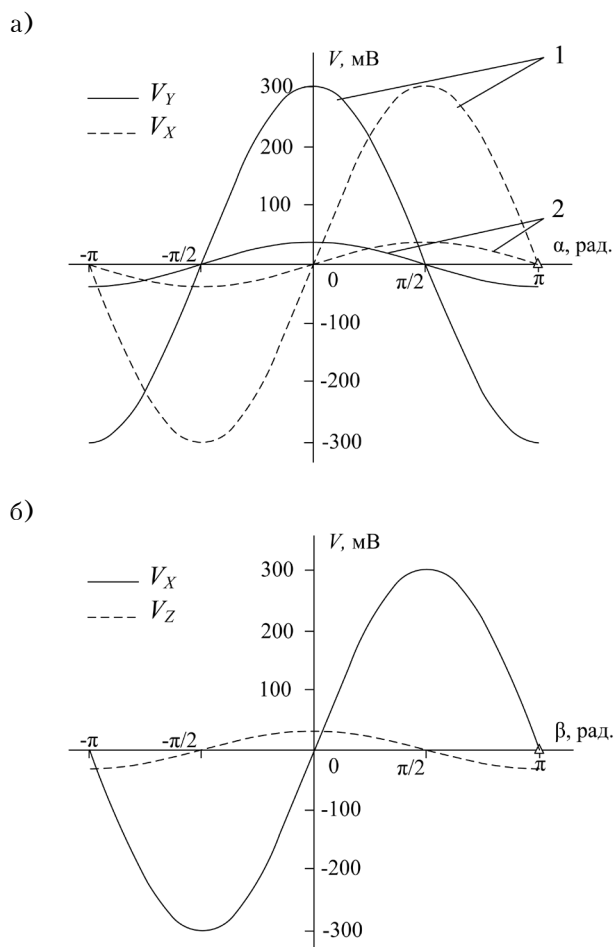


Рис. 8. Зависимость напряжения Холла  $V_x$ ,  $V_y$  (а),  $V_x$ ,  $V_z$  (б) от угла отклонения магнитного потока (на а кривые 1 — для системы с ИМК из супермендюр; 2 — для системы без ИМК)

но, что каждому углу  $\alpha$  соответствует уникальный набор значений напряжений Холла  $V_x$  и  $V_y$ . На рисунке для сравнения приведены данные для систем с концентратором и без него.

На рис. 8, б представлены зависимости напряжения Холла от угла отклонения магнитного потока от нормали к поверхности ДХ  $\beta$ . Напряжение Холла достигает значений вплоть до 302,6 мВ для параллельного магнитного потока и 28,0 мВ для перпендикулярного. Следует отметить, что величина  $V_z$  не зависит от наличия ИМК, поскольку, как уже отмечалось выше, коэффициент усиления концентратора при перпендикулярном направлении магнитного поля равен 1.

### Заключение

Проведенный анализ влияния геометрических размеров, величины краевого угла и используемого материала магнитного концентратора, интегрированного на поверхность кремниевой пластины, на характеристики трехмерного датчика магнитного поля показал, что включение в конструкцию датчика Холла концентратора из ферромагнитного материала может обеспечить значительное (до 10 раз) повышение коэффициента усиления магнитного потока, что позволяет применять исследуемые конструкции датчиков для детектирования слабых магнитных полей (от 0,01 мкТл до 2,0 мТл).

Показано, что выполненный из супермендюр магнитный концентратор дискообразной формы диаметром 200 мкм и толщиной 10 мкм с краевым углом  $60^\circ$  обеспечивает усиление магнитного потока величиной 120 мТл (максимально возможное значение, при котором концентратор может выполнять его усиление) с коэффициентом 10,81.

Результаты проведенного приборно-технологического моделирования свидетельствуют о перспективности применения предложенного магниточувствительного сенсора с интегрированным магнитным концентратором дискообразной формы в трехмерных датчиках слабых магнитных полей, обладающих магнитной чувствительностью по току до 3026 В/(А·Тл) вдоль поверхности датчика.

Сенсорные устройства предложенной конструкции существенно расширяют сферу применения датчиков Холла и могут эффективно использоваться в качестве элементной базы аппаратуры магнитно-резонансной терапии, а также приборов для геологических и геодезических исследований.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Бараночников М. Л. Микромагнитоэлектроника. Т. 1. — Москва: ДМК Пресс, 2001.
2. Буслов И., Бауткин В., Драпезо А., Ярмолович В. Датчики слабых магнитных полей на эффекте Холла // Современная электроника. — 2011. — № 1. — С. 12–17.
3. Palumbo V., Marchesi M., Chiesi V. et al. Hall current sensor IC with integrated Co-based alloy thin film magnetic concentrator // EDP Sciences. — 2013. — P. 16002-p1–16002-p4. — <https://doi.org/10.1051/epjconf/20134016002>
4. Popovic R. S., Drljaca P. M., Kejik P. CMOS magnetic sensors with integrated ferromagnetic parts // Sensors and Actuators. — 2006. — A. 129. — P. 94–99. — <https://doi.org/10.1016/j.sna.2005.11.048>
5. Прокошин В. И., Ярмолович В. А., Драпезо А. П. О разработке и применении концентраторов магнитного потока для устройств микромагнитоэлектроники // Вестник БГУ. — 2014. — Сер. 1. — № 2. — С. 39–43.
6. Ripka P., Janosek M. Advances in magnetic field sensors // Sensors. — 2010. — Vol. 10, N 6. — P. 1108–1116. — <https://doi.org/10.1109/JSEN.2010.2043429>
7. Dao Dinh Ha, Stempitsky V. R. Investigation of the Hall sensor characteristics with various geometry of the active area // Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika. — 2018. — Vol. 20, N 3. — P. 174–186. — <https://doi.org/10.17587/nmst.20.174-186>
8. <http://www.silvaco.com>
9. Meecker D. Magnetis Finite Element Method (femm). version 4.2 [Electronic resource]. Mode of access: <http://www.femm.info/wiki/HomePage> (Date of access: 12.01.2016).
10. Дао Динь Ха, Волчек В. С., Баранова М. С. и др. Интегральный трехмерный магнитометр на основе датчиков Холла, изготовленный по стандартной КМОП технологии // Доклады БГУИР. — 2016. — № 7 (101). — С. 167–171.

Дата поступления рукописи  
в редакцию 16.04 2018 г.

В. Р. СТЕМПИЦЬКИЙ, ДАО ДИНЬ ХА

Республика Беларусь, м. Минск,  
Белорусский державний университет інформатики і радіоелектроніки  
E-mail: [vstem@bsuir.by](mailto:vstem@bsuir.by),  
[ha.dao.dinh@bsuir.by](mailto:ha.dao.dinh@bsuir.by)

ПРИЛАДОВО-ТЕХНОЛОГІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ  
МАГНІТОЧУТЛИВОГО СЕНСОРА З ІНТЕГРОВАНІМ  
МАГНІТНИМ КОНЦЕНТРАТОРОМ

*Представлено результати дослідження та оптимізації конструктивних і експлуатаційних характеристик на основі даних приладово-технологічного моделювання магніточутливого сенсора з інтегрованим магнітним концентратором (ІМК) дискподібної форми.*

*Висока магнітна проникність матеріалу ІМК забезпечує високе значення індукції магнітного поля по його краях, що призводить до значного посилення доданого зовнішнього поля. Тобто ІМК виконує роль магнітного підсилювача, а також впливає на відношення сигнал/шум і сигнал/зсв. При цьому, однак, магнітне посилення залежить не тільки від розмірів ІМК, а й від його форми.*

*Аналіз впливу геометричних розмірів, крайового кута і використовуваного матеріалу інтегрованого магнітного концентратора на характеристики тривимірного датчика магнітного поля показав, що включення в конструкцію датчика Холла концентратора з ферромагнітного матеріалу забезпечує значне (до 10 разів) підвищення коефіцієнта посилення магнітного потоку, що дозволяє застосовувати датчики досліджуваної конструкції для детектування слабких магнітних полів (від 0,01 мТл до 2 мТл).*

*Показано, що виконаний з супермендюра магнітний концентратор дискподібної форми діаметром 200 мкм і товщиною 10 мкм з крайовим кутом 60° забезпечує посилення магнітного потоку величиною 120 мТл (максимальне значення, при якому концентратор може виконувати посилення магнітного потоку) з коефіцієнтом 10,81.*

*Отримані результати свідчать про перспективність застосування запропонованого конструктивного рішення для виготовлення тривимірних датчиків слабких магнітних полів, що мають магнітну чутливість за струмом до 3026 В/(А·Тл) уздовж поверхні датчика. Розглянутий тип сенсорних пристроїв істотно розширює сферу застосування датчиків Холла і може ефективно використовуватися як елементна база для медичної апаратури, обладнання для магнітно-резонансної терапії, а також в приладах для геологічних і геодезичних досліджень.*

*Ключові слова: магніточутливий сенсор, інтегрований магнітний концентратор, датчик Холла, ферромагнітний матеріал.*

DEVICE-TECHNOLOGICAL SIMULATION OF THE MAGNETOSENSITIVE  
SENSOR WITH INTEGRATED MAGNETIC CONCENTRATOR

*The paper presents results on research and optimization on the basis of device-technological modeling of the structural and operational characteristics of the magnetosensitive sensor with a disk-shaped integrated magnetic concentrator (IMC).*

*The high magnetic permeability of the IMC material provides a high value of the induction of the magnetic field along its edges, which leads to a significant enhancement of the applied external field. The IMC plays the role of a magnetic amplifier, and also affects the signal-to-noise and signal-to-bias ratios; the magnetic gain depends not only on the size of the IMC, but also on its shape.*

*This research is devoted to the development of a disc-shaped magnetic concentrator integrated into the Hall sensor. The concentrator has a high magnetic flux gain and can be used in 3D magnetic field recording systems.*

*Analysis of the geometric dimensions, deflection angle and the material of the integrated magnetic concentrator influence on the characteristics of a three-dimensional magnetic field sensor showed that the inclusion of a ferromagnetic concentrator in the Hall sensor design provides a significant (up to 10 times) increase in the magnetic flux gain. This makes it possible to use the investigated sensor designs to detect weak magnetic fields (from 0.01  $\mu\text{T}$  to 2 mT).*

*It is shown that a supermindure integrated magnetic disc-shaped concentrator with a diameter of  $D = 200 \mu\text{m}$ , a thickness of  $l = 10 \mu\text{m}$  and an angle of deflection of  $\theta = 60^\circ$  provides a magnetic flux gain  $G = 10.81$  with a maximum external magnetic field of  $B_0 = 120 \text{ mT}$ .*

*The obtained results indicate the prospects of using the proposed constructive solution for the practical manufacture of three-dimensional sensors of weak magnetic fields with a magnetic sensitivity up to 3026 V/(A·T) along the sensor surface. The type of sensor devices studied extends the scope of Hall sensors as an elemental base of medical equipment, equipment for magneto-resonant imaging (MRI), and also in instruments for geological and geodetic research.*

*Keywords: magnetosensitive sensor, integrated magnetic concentrator, Hall sensor, ferromagnetic material.*

## REFERENCES

1. Baranochnikov M. L. *Micromagneto-electronics. Vol. 1.* Moscow, DMK press, 2011, 544 p. (Rus)
2. Buslov I., Bautkin V., Drapezo A., Yarmolovich V. [Sensors of weak magnetic fields on the Hall effect]. *Sovremennaya elektronika*, 2011, no. 1, pp. 12-17. (Rus)
3. Palumbo V., Marchesi M., Chiesi V., Paci D., Iuliano P., Toia F., Casoli F., Ranzieri P., Albertini F., Morelli M. Hall current sensor IC with integrated co-based alloy thin film magnetic concentrator. *EDP Sciences*, 2013, pp. 16002-p1 – 16002-p4. <https://doi.org/10.1051/epj-conf/20134016002>
4. Popovic R. S., Drljaca P. M., Kejik P. CMOS magnetic sensors with integrated ferromagnetic parts. *Sensors and Actuators*, 2006, A. 129, pp. 94-99. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2005.11.048>
5. Prokoshin V. I., Yarmolovich V. A., Drapezo A. P. [Development and application of magnetic flux concentrators for devices of micromagneto-electronics]. *Vestnik BGU*, 2014, vol. 1, no. 2, pp. 39-43. (Rus)
6. Ripka P., Janosek M. Advances in magnetic field sensors. *Sensors*, 2010, vol. 10, no. 6, pp. 1108-1116. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2010.2043429>
7. Dao Dinh Ha, Stempitsky V. R. Investigation of the Hall sensor characteristics with various geometry of the active area. *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 3, pp. 174-186. <https://doi.org/10.17587/nmst.20.174-186>
8. <http://www.silvaco.com>
9. Meeker D. *Magnetics Finite Element Method (femm)*. Version 4.2 [Electronic resource]. Mode of access: <http://www.femm.info/wiki/HomePage> (Date of access: 12.01.2016).
10. Dao Dinh Ha, Volchek V., Baranova M., Lovshenko I., et al. [Three-dimensional magnetometer based on hall sensors integrated in standard CMOS technology]. *Doklady BSUIR*, 2016, no. 7 (101), pp. 167-171. (Rus)

**Описание статьи для цитирования:**

Стемпитский В. Р., Дао Динь Ха. Приборно-технологическое моделирование магниточувствительного сенсора с интегрированным магнитным концентратором. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2018, № 3, с. 15–21. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2018.3.15>

**Cite the article as:**

Stempitsky V. R., Dao Dinh Ha. Device-technological simulation of the magnetosensitive sensor with integrated magnetic concentrator. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoy Apparature*, 2018, no. 3, pp. 15-21. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2018.3.15>