

процесс диагностики, освободит специалиста от рутинного труда, ускорит процесс получения результатов исследования. Разработанное программное обеспечение, реализующее данный метод, позволяет проводить визуализацию в режиме реального времени, что, в свою очередь, дает возможность проводить терапию биологической обратной связи с пациентом. Данный метод обеспечивает возможность поиска других патологических паттернов, ускорит время компьютерной обработки и анализ большего числа каналов ЭЭГ, что увеличит точность обнаружения локализации патологического процесса и качество биологической обратной связи.

### THREE-DIMENSIONAL INTERACTIVE VISUALIZATION PATHOLOGICAL ACTIVITY BRAIN

O.P. VYSOTSKY, T.S. BOBROVA, D.I. ZMITRUKOVICH,  
G.I. OVSYANKINA, A.A. BORISKEVICH, M.V. DAVYDOV

#### Abstract

The article examines patterns of abnormal brain activity of human type «spike» and type «sharp wave». The program automatically detect the type of «Spike» and patterns such as «sharp wave» based on wavelet transform and mathematical package MATLAB. It creates an interactive three-dimensional visualization of the pathological activity of the «spike» of the human brain and the type of «sharp wave».

*Keywords:* abnormal brain activity, automatic detection of patterns, wavelet transform.

#### Список литературы:

1. Гусев Е.И. Неврология. Национальное руководство. М., 1999.
2. Гнездицкий В.В. Обратная задача ЭЭГ и клиническая электроэнцефалография (картирование и локализация источников электрической активности мозга). М., 2004.
3. Добеши И.Р. Десять лекций по вейвлетам. Ижевск, 2001.
4. Короновский А.А., Храмов А.Е. Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения. М., 2003.
5. Menke W., Menke J. Environmental Data Analysis With MATLAB. Elsevier, 2011.

УДК 621.382

### ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ТРЕХМЕРНЫЙ МАГНИТОМЕТР НА ОСНОВЕ ДАТЧИКОВ ХОЛЛА, ИЗГОТОВЛЕННЫЙ ПО СТАНДАРТНОЙ КМОП-ТЕХНОЛОГИИ

ДАО ДИНЬ ХА, В.С. ВОЛЧЁК, М.С. БАРАНОВА,  
И.Ю. ЛОВШЕНКО, Д.Ч. ГВОЗДОВСКИЙ, В.Р. СТЕМПИЦКИЙ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь*

*Поступила в редакцию 22 ноября 2016*

Представлены результаты приборно-технологического моделирования горизонтальных и вертикальных структур датчика Холла, используемых в качестве элемента интегрального трехмерного магнитометра. Исследованы зависимости напряжения Холла от величины и угла отклонения вектора индукции магнитного поля, а также зависимости чувствительности от температуры. Проведено моделирование из первых принципов соединения халькогенидной шпинели  $\text{CuCr}_2\text{Se}_4$ , применяемого в качестве материала концентратора магнитного поля.

*Ключевые слова:* магнитно-резонансная томография, датчик Холла, компьютерное моделирование, концентратор магнитного поля.

### Введение

Высокий мягкотканый контраст, позволяющий получать качественные изображения мягких тканей без применения контрастного препарата, наряду с отсутствием лучевой нагрузки являются главными преимуществами магнитно-резонансной томографии (МРТ). Развитие аппаратов МРТ с широкими и короткими туннелями привело к возникновению такого направления медицины, как минимально-инвазивная хирургия, управляемая посредством МРТ. Для облегчения процедуры хирургического вмешательства необходим эффективный метод слежения за рабочим инструментом на МРТ-изображении от точки введения до целевой области, например, опухоли.

Один из таких методов основан непосредственно на уникальном отношении, существующем между пространственными координатами туннеля МРТ-сканера и компонентами градиента его магнитного поля. Разработав миниатюрный трехмерный магнитометр, измеряющий градиент магнитного поля, можно получить несложную в управлении систему пространственного слежения. Основу первого подобного магнитометра, запатентованного в 2003 г. [1] и внедренного позже в коммерческое производство, составляли индукционные катушки, миниатюризация которых представлялась крайне сложной задачей, что препятствовало их интеграции в миниатюрный прибор. Применение одномерного магнитометра на основе датчика Холла (ДХ) впервые предложено в 2004 г. [2]. Такой прибор измеряет величину индукции магнитного поля лишь вдоль нормали к поверхности ДХ, что требует точной ориентации поверхности в магнитном поле, затрудняя тем самым практическое использование подобных приборов. Трехмерный магнитометр на основе трех ДХ, расположенных в трех взаимно перпендикулярных плоскостях, представлен в 2007 г. [3]. Однако изготовление такого прибора требует задействование нестандартных решений, что приводит к усложнению технологии и стоимости конечного продукта.

Использование эффекта концентрации магнитного потока ферромагнитными устройствами определенных геометрических форм в современной микромагнитоэлектронике позволяет разрабатывать сенсоры для измерения слабых магнитных полей. Их магнитная чувствительность на 2–3 порядка превышает среднестатистическую величину стандартного элемента Холла без ухудшения шумовых характеристик и временной стабильности [4].

Получения высоких значений коэффициента усиления магнитного потока  $K_H$  в сочетании с миниатюризацией требует проведения оптимизации геометрических размеров концентраторов, их формы, зазоров и свойств используемого материала. Решение проблем такой оптимизации целесообразно осуществлять с помощью компьютерного моделирования.

### Исследуемая структура

Для устранения недостатков магнитометра на основе трех ДХ, расположенных в трех взаимно перпендикулярных плоскостях, предложена система, состоящая из двух вертикальных и одного горизонтального ДХ, сформированных на одной кремниевой подложке с использованием стандартной 0,35-мкм КМОП технологии (рис. 1). Расположенные под прямым углом относительно друг друга вертикальные ДХ измеряют составляющие индукции магнитного поля, ориентированные в плоскости кремниевой подложки. Горизонтальный ДХ предназначен для измерения составляющей индукции поля, направленной по нормали к поверхности подложки.

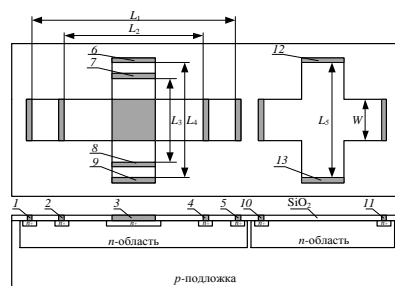


Рис. 1. Структура трехмерного магнитометра на основе двух вертикальных и одного горизонтального ДХ

В приповерхностном слое кремниевой подложки  $p$ -типа электропроводности с концентрацией примеси  $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  создаются две  $n$ -области глубиной 1,4 мкм. В одной из этих областей формируются два перпендикулярных относительно друг друга вертикальных ДХ с геометрическими размерами  $L_1 = 25 \text{ мкм}$ ,  $L_2 = 20 \text{ мкм}$ ,  $L_3 = 6 \text{ мкм}$  и  $L_4 = 9 \text{ мкм}$ , а в другой – холловский крест из полосок длиной  $L_5 = 9 \text{ мкм}$  и шириной  $W = 3 \text{ мкм}$ . Прилегающие к омическим контактам 1, 5, 6, 9 и 10  $n^+$ -области легированы фосфором до уровня  $10^{21} \text{ см}^{-3}$ . Контакты 3 и 11 представляют собой токовые контакты для вертикальных ДХ и холловского креста, соответственно. Холловские электроды 2, 4, 7 и 8 предназначены для измерения напряжения Холла при воздействии магнитного поля, ориентированного в плоскости подложки, в то время как электроды 12 и 13 используются для измерения напряжения Холла при воздействии поля, направленного по нормали к поверхности подложки.

### Результаты и их обсуждение

Моделирование технологического процесса изготовления и электрических характеристик приборной структуры трехмерного магнитометра на основе двух вертикальных и одного горизонтального ДХ, проводилось с использованием комплекса компании Silvaco [5].

При моделировании электрических характеристик электроды 1, 5, 6 и 9 вертикальных ДХ подключаются к шине земли, а токовый электрод 3 – к положительному полюсу источника питания. Соответственно, для горизонтального ДХ электрод 10 заземляется, а токовый электрод 11 подключается к положительному полюсу источника питания. Выходные сигналы снимаются с холловских электродов  $V_X$  (7 и 8),  $V_Y$  (2 и 4) и  $V_Z$  (12 и 13). После усиления сигналы поступают на вход многоканального аналого-цифрового преобразователя.

На рис. 2 представлены зависимости напряжений Холла  $V_X$ ,  $V_Y$  и  $V_Z$  от индукции приложенного магнитного поля  $B$ . Напряжение питания  $V_{\text{пит}}$  составляет 3,3 В. Нелинейность выходных характеристик в интервале от 0 до 0,3 Тл составляет не более 0,4 %, а в интервале от 0 до 1,0 Тл не превышает 1,0 %. Сравнительный анализ показывает, что напряжение Холла имеет различные значения в зависимости от направления:  $V_X = 88 \text{ мВ}$ ,  $V_Y = 47 \text{ мВ}$  и  $V_Z = 110 \text{ мВ}$  при индукции магнитного поля  $B = 1,0 \text{ Тл}$ .

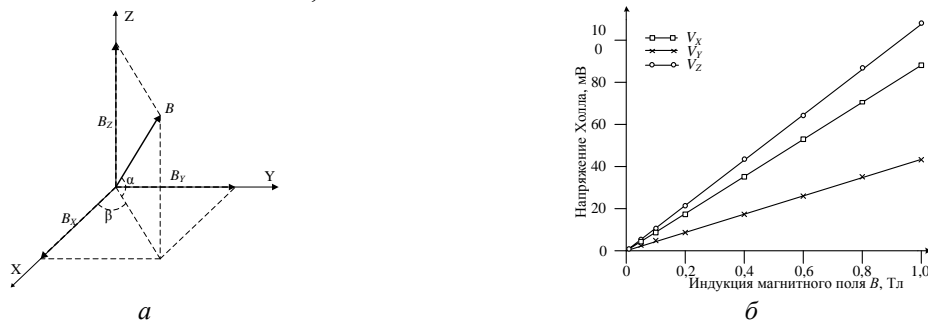


Рис. 2. Составляющие вектора магнитной индукции (а) и зависимости напряжений Холла от индукции магнитного поля (б)

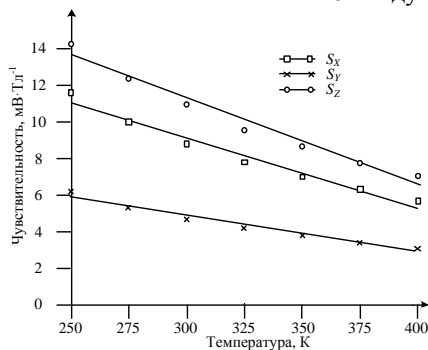


Рис. 3. Зависимости чувствительности от температуры

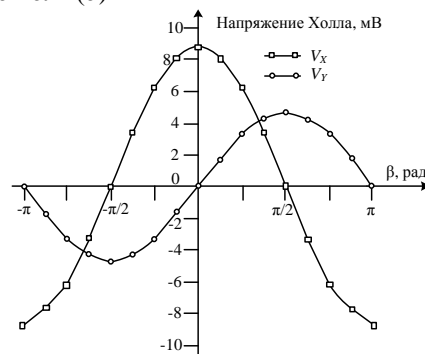


Рис. 4. Зависимости напряжений Холла от угла отклонения beta

Температурные зависимости значений чувствительности при индукции магнитного поля  $B = 0,1$  Тл и напряжении питания  $V_{пит} = 3,3$  В представлены на рис. 3. Результаты расчетов показывают, что при повышении температуры до значения 400 К значения чувствительности  $S_X$ ,  $S_Y$  и  $S_Z$  уменьшаются в 1,54; 1,51 и 1,55 раз, соответственно. При этом температурные коэффициенты составляют:  $T_{sX} = -0,04$  мВ/К,  $T_{sY} = -0,02$  мВ/К и  $T_{sZ} = -0,05$  мВ/К.

На рис. 4 представлены зависимости напряжений Холла от угла отклонения  $\beta$  при ориентации вектора индукции магнитного поля  $B = 0,1$  Тл вдоль поверхности магнитометра (угол  $\alpha = 0$  рад). Из представленных материалов видно, что каждому углу  $\beta$  соответствует уникальный набор значений напряжений Холла  $V_X$  и  $V_Y$ .

Для решения задачи выбора и определения свойств материала концентратора магнитного поля проведено моделирование из первых принципов соединения со структурой шпинели (халькогенидной шпинели  $CuCr_2Se_4$ ). Данное трехкомпонентное соединение, в состав которого входят переходные металлы, проявляет ферромагнитные свойства при высокой температуре Кюри (444 К), что является ключевым фактором определяющим его роль в сенсорных устройствах [6]. Первопринципные расчеты проводились в рамках теории функционала электронной плотности (программный комплекс VASP). Точность теории Кона-Шэма в практических применениях зависит от выбора аппроксимации для обменно-корреляционной энергии. Моделирование проводилось с использованием четырех вариантов обменно-корреляционного функционала: аппроксимация локальной плотности (LDA), приближение обобщенного градиента (GGA), дополненные Хаббард коррекцией (LDA+U, GGA+U) с коэффициентами Хаббарда  $U(Cu) = 5$  эВ,  $U(Cr) = 5$  эВ. Электронные волновые функции учитывались с помощью базисного набора плоских волн с энергией обрезания 350 эВ, выбранной исходя из тестовых расчетов по поиску сходимости. Интегрирование в импульсном пространстве проводилось по сетке k-точек  $5 \times 5 \times 5$ , сгенерированной по Гамма-схеме. Для зонных вычислений был выбран контур L-G-X-G-K-L. Критерий сходимости считался достигнутым, когда разница между двумя предыдущими шагами не превышала  $10^{-6}$ . Выполнены расчеты структурных свойств  $CuCr_2Se_4$ . Точечная группа симметрии соединения  $R\bar{6}/mmm$  (191). Получено значение параметра постоянной решетки и объема ячейки для разных вариантов обменно-корреляционного функционала представлены в таблице.

Результаты моделирования  $CuCr_2Se_4$

Параметр	LDA+U	GGA	GGA+U	LDA	Экс. [6]
$a, \text{Å}$	10,2654378	10,3845048	10,5851054	10,3983355	10,334
$V, \text{Å}^3$	1081,76	1119,84	1186,00	1124,32	1104,54
$\rho$	45,3751	40,7641	44,2398	40,7709	45,51
$E_g, \text{эВ}$	0,12	0,2	0	0,23	0,2

Самосогласованный расчет выполнялся с учетом спиновой поляризации. При расчете зонной диаграммы был выбран контур L-G-X-G-K-L точек высокой симметрии в приведенной зоне Бриллюэна (рис. 5).

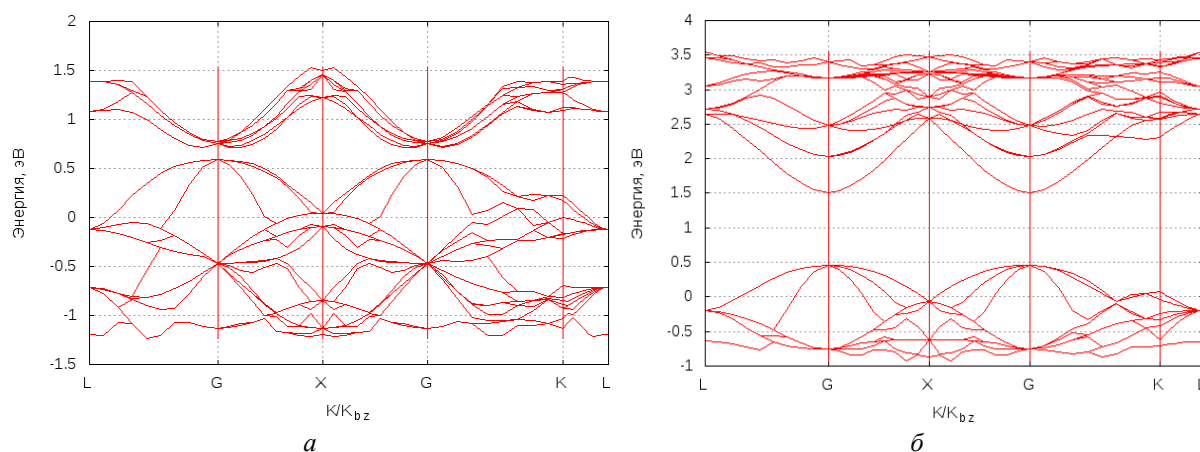


Рис. 5. Зонные диаграммы LDA+U для электронов с направлением спина вверх (а) и вниз (б)

Лучше согласие структурных параметров с экспериментом достигается при использовании GGA и LDA+U функционалов. Основной вклад в значение магнитного момента вносят ионы хрома. Данное соединение ( $\text{CuCr}_2\text{Se}_4$ ) проявляет ферромагнитные свойства и может быть использовано в качестве концентратора магнитного потока.

### Заключение

По результатам приборно-технологического моделирования приборной структуры трехмерного магнитометра на основе двух вертикальных и одного горизонтального датчика Холла установлено, что выходные характеристики датчиков имеют линейный характер: нелинейность выходных характеристик в интервале от 0 до 0,3 Тл не превышает 0,4 %, а в интервале от 0 до 1,0 Тл – 1,0 %. Показано, что конструктивные особенности датчиков (геометрические размеры) являются причиной различных значений напряжения Холла в зависимости от направления:  $V_X = 88$  мВ,  $V_Y = 47$  мВ и  $V_Z = 110$  мВ. Установлено, что при величине индукции магнитного поля  $B = 0,1$  Тл и повышении температуры до значения 400 К значения чувствительности  $S_X$ ,  $S_Y$  и  $S_Z$  уменьшаются в 1,54; 1,51 и 1,55 раз, соответственно. При этом температурные коэффициенты составляют  $T_{sX} = -0,04$  мВ/К,  $T_{sY} = -0,02$  мВ/К и  $T_{sZ} = -0,05$  мВ/К. Установлено, что каждому углу  $\beta$  (при  $\alpha = 0$  рад) соответствует уникальный набор значений напряжений Холла  $V_X$  и  $V_Y$ . Это свидетельствует о возможности использования рассматриваемых структур датчиков Холла, в качестве элементов трехмерного магнитометра.

В рамках квантово-механического подхода исследованы электронные и магнитные свойства халькогенидной шпинели  $\text{CuCr}_2\text{Se}_4$ . Установлено, что соединение ( $\text{CuCr}_2\text{Se}_4$ ) проявляет ферромагнитные свойства и может быть использовано в качестве концентратора магнитного потока. Магнитный момент равен  $45,38 \mu_B$  (магнетон Бора).

*Работа проводилась в рамках выполнения задания 1.8.05 ГПНИ «Информатика, космос и безопасность», а также международного проекта программы «ГКНТ-Литва» № Ф15ЛИТ-004 «Исследование электронных свойств наноструктур с комплексами магнитоактивных дефектов».*

## THREE-DIMENSIONAL MAGNETOMETER BASED ON HALL SENSORS INTEGRATED IN STANDARD CMOS TECHNOLOGY

DAO DINH HA, V. S. VOLCHEK, M. S. BARANAVA, I. Yu. LOVSHENKO,  
D. C. HVAZDOUSKI, V. R. STEMPITSKY

### Abstract

The results of the device simulation of a three-dimensional magnetometer based on Hall sensors integrated in a standard CMOS technology are presented. The Hall voltage vs magnetic field, Hall voltage vs magnetic field deviation angle, and sensitivity vs temperature curves were measured. The first-principles simulation of chalcogenide spinel  $\text{CuCr}_2\text{Se}_4$  used in creation of a magnetic field concentrator was performed.

*Keywords:* magnetic resonance imaging, a Hall sensor, computer simulation, hub of the magnetic field.

### Список литературы

1. Method and apparatus to estimate location and orientation of objects during magnetic resonance imaging : pat. US6516213, USA / E. Nevo ; publ. date: 04.02.2003.
2. Scheffler K., Korvink J.G. // Proc. of the ISMRM. 2004. P. 950.
3. Van der Meer J. // Proc. of the 6th IEEE Conference on Sensors. 2007. P. 563–564.
4. Бараночников М.Л. Микромагнитоэлектроника. Т. 1. М., 2001.
5. Victory Process User's Manual User's Manual. Device simulation software. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: victoryprocess\_users.pdf. – Дата доступа: 30.10.2015.
6. Bettinger J.S., Chopdekar R.V., Liberati M. // J. Mag. and Mag. Mat. 2007. Vol. 18. P. 65–73.