

УДК 621.382

ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ ХОЛЛА

ДАО ДИНЬ ХА, В.Р. СТЕМПИЦКИЙ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 16 мая 2018

Аннотация. Представлены результаты приборно-технологического и схемотехнического моделирования кремниевого датчика Холла с целью определения его динамических характеристик. Исследовано влияние размеров активной области, определены теоретическое и фактическое значения верхнего предела полосы пропускания датчика Холла с учетом внутренней паразитной емкости, а также при наличии и отсутствии емкостной нагрузки. Промоделированы характеристики датчика Холла, совмещенного на одном кристалле с дифференциальным усилителем.

Ключевые слова: датчик Холла, приборно-технологическое и схемотехническое моделирование, емкостная нагрузка, дифференциальный усилитель.

Abstract. The results of device-technological and schematic simulation of the silicon Hall sensor with the purpose of determine its dynamic characteristics are presented. The influence of the dimensions of the active region is investigated, the theoretical and actual values of the upper limit of the bandwidth of the Hall sensor are determined, taking into account the internal parasitic capacitance, and the presence and absence of a capacitive load. The characteristics of the Hall sensor combined on a single crystal with a differential amplifier are simulated.

Keywords: Hall sensor, device-technological and schematic simulation, capacitive load, differential amplifier.

Doklady BGUIR. 2018, Vol. 114, No. 4, pp. 64-70

Frequency characteristics of integral Hall sensor

Dao Dinh Ha, V.R. Stempitsky

Введение

В различных технических системах для контроля движения, положения, скорости, направления, тока, уровня и других параметров широко применяются бесконтактные магнитоиндуктивные элементы, принцип действия которых основан на эффекте Холла.

Датчики Холла (ДХ), несмотря на простоту реализации, имеют ряд ограничений по рабочим частотам, верхний предел которых составляет сотни килогерц. Анализ полосы пропускания, как правило, ограничен теоретическими исследованиями, в которых не рассматриваются вопросы, связанные с учетом паразитных динамических эффектов, возникающих в реальной структуре ДХ.

В настоящее время существует большая потребность в ДХ с верхним пределом полосы пропускания в области 1 МГц. Наибольшее значение данной характеристики для доступных на рынке ДХ составляет 120 кГц [1], что на порядок ниже необходимого для современных высокочастотных энергосистем.

В [2] исследованы верхние пределы полосы пропускания датчиков тока на основе эффекта Холла. Описана методика измерения, позволяющая экспериментально оценить время отклика ДХ без учета паразитных эффектов. Предложена эквивалентная схема и модель экспериментально измеренного динамического отклика ДХ. Определены два верхних предела полосы пропускания:

- теоретический (до 100 МГц), описываемый внутренней емкостью, возникающей при накоплении поперечного заряда при воздействии эффекта Холла;
- фактический предел, определяемый емкостным входом электронного интерфейса (от 9 до 18 МГц).

В [3, 4] рассмотрены основные ограничения по чувствительности и полосе пропускания комплементарной структуры металл-оксид-полупроводник ДХ посредством трехмерного моделирования с использованием модели гальванического переноса. По результатам моделирования полоса пропускания рассматриваемых датчиков находится в мегагерцовом диапазоне. Исследованы динамические характеристики ДХ, представляемого моделью на основе RC -цепи, где R – сопротивление датчика, а C – его суммарная емкость. Показано, что время установления зависит от величины магнитного поля, тока источника питания, а высокие значения полосы достигаются посредством минимизации емкостной нагрузки на контактах либо использования высоколегированного n -кармана в качестве активной области.

В [5, 6] описаны примеры практической реализации ДХ с верхним пределом полосы пропускания от 250 кГц до 1 МГц. Однако представленные решения изготовлены на основе нестандартных полупроводниковых соединений либо сочетают элемент Холла с катушкой индуктивности для достижения широкополосной возможности.

Таким образом, важной задачей является исследование и поиск конструктивных решений ДХ, для которых можно обозначить следующие характеристики, влияющие на верхний предел полосы пропускания: время релаксации носителей заряда; индуктивные и емкостные эффекты.

Первый предел (в диапазоне ТГц–ПГц), обусловленный эффектами рассеяния, устанавливает теоретические возможности и не достижим для современных методов и конструкций ДХ [7]. Второй и третий пределы, связанные с внутренними физическими процессами в ДХ, такими как влияние геометрических и технологических характеристик, могут быть расширены в рамках оптимизации конструкции датчика.

Исследуемые конструкции и методика моделирования

Исследуемая в работе конструкция датчика Холла сформирована на кремниевой подложке p -типа (концентрация бора N_A) толщиной 5 мкм с активной областью n -типа толщиной d , легированной мышьяком с концентрацией N_D . Ширина W и длина L n -кармана являются типичными размерами. Ширина контактов составляет 0,7 мкм, расстояние от контактов до границы n -типа – 0,35 мкм для крестообразных образцов. Позиция контактов по отношению к границам важна при анализе остаточного напряжения, поскольку ошибки контура могут привести к его увеличению [8].

Процессы переноса носителей заряда описываются фундаментальной системой уравнений и диффузионно-дрейфовыми моделями, которые включают уравнения непрерывности для электронов и дырок и уравнения Пуассона при воздействии электрических и магнитных полей [9–11]. Учет магнитного поля, воздействующего на активную область приборной структуры ДХ и приводящего к возникновению напряжения Холла, осуществлялся на основе модели гальванического переноса.

Адекватные результаты моделирования могут быть получены только при правильном задании математических моделей описания физических процессов, происходящих в структуре полупроводниковых приборов: моделей подвижности, рекомбинации, статистики носителей заряда. Для описания статистики носителей заряда в используемом для моделирования программном комплексе компании Silvaco [12] выбрана модель Больцмана, для учета зависимости подвижности носителей заряда от концентрации – модель Конканона и для описания процессов рекомбинации – модель Шоттки-Рида-Холла [11].

Эффективное схемотехническое моделирование и оптимизация сенсорных систем, состоящих из датчика и схемы обработки (усилитель + аналогово-цифровой преобразователь), возможно при наличии электрической (компактной) модели, адекватно описывающей электрические и частотные характеристики ДХ. В [13] описаны подходы и результаты использования подобных моделей для применения в составе систем компьютерного моделирования в микроэлектронике.

На рис. 1 представлена эквивалентная схема для описания электрической модели ДХ. В данной схеме основным элементом, оказывающим влияние на частотные характеристики ДХ, является паразитная емкость C_0 , возникающая между n -карманом и p -подложкой. Величина данной емкости на единицу площади описывается следующим уравнением:

$$C_0 = \sqrt{\frac{q\epsilon_{Si}N_D N_A}{2(N_D + N_A)}} \left[V_i - V - \frac{2kT}{q} \right]^{-1/2}, \text{ где } V_i \text{ — это встроенный потенциал } p\text{-}n\text{-перехода.}$$

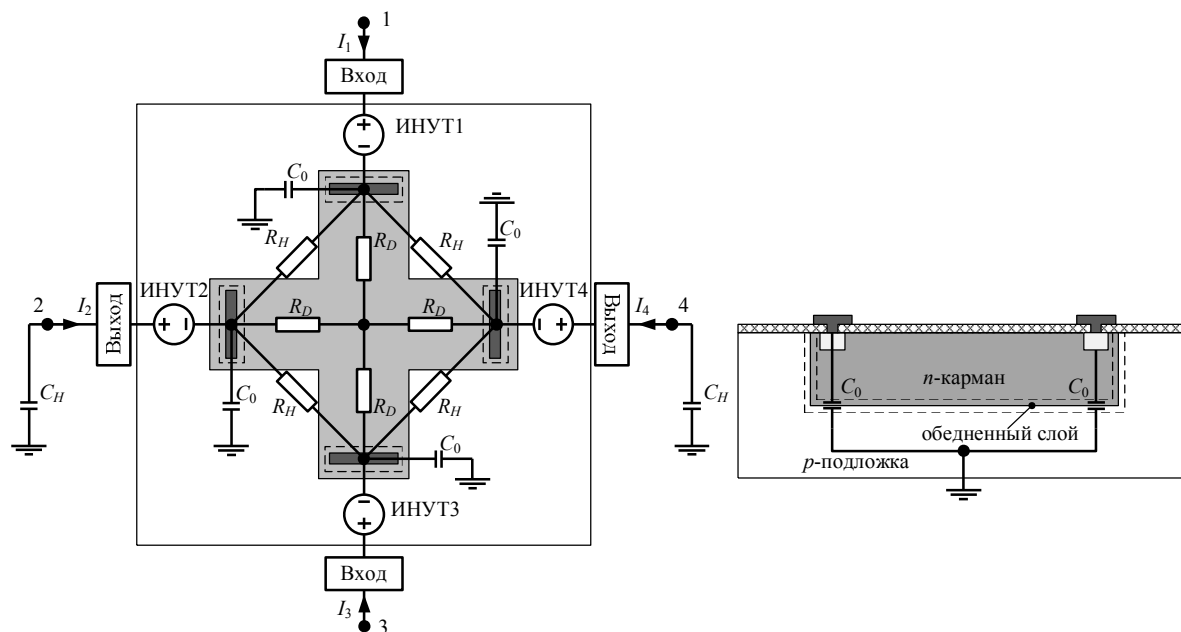


Рис. 1. Конструкция и эквивалентная схема датчика Холла

Результаты моделирования

На рис. 2 представлены результаты моделирования в виде зависимости нормированного напряжения Холла от времени его установления для ДХ с размерами $60 \times 20 \text{ мкм}^2$ при изменении индукции магнитного поля от 0 до 100 мТ для трех конструкций с различными значениями концентраций примеси в активной области при отсутствии и наличии емкостной нагрузки. Величина нормированного напряжения Холла выражается как отношение текущего значения напряжения Холла к его максимальному значению в заданный момент времени.

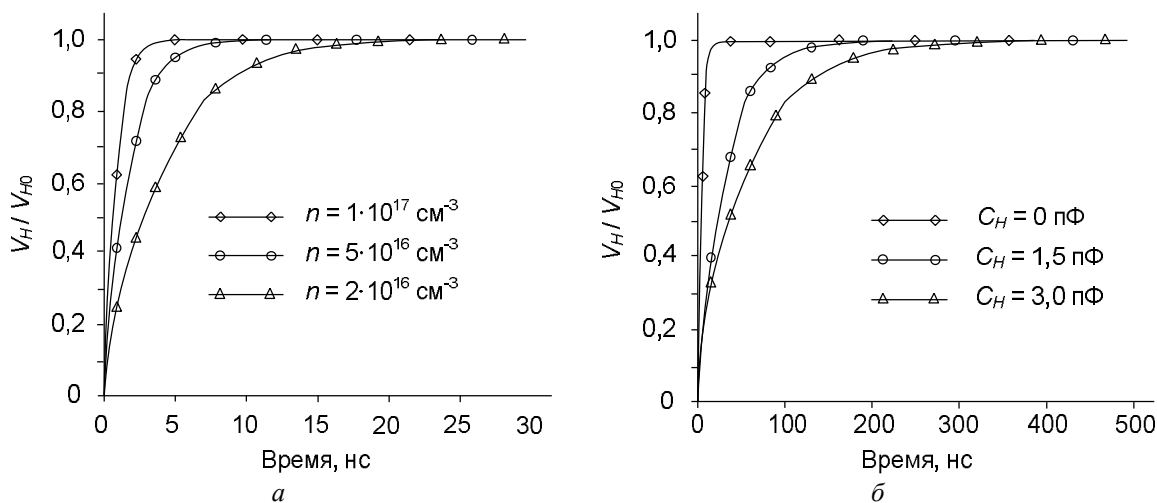


Рис. 2. Зависимости нормированного напряжения Холла от времени его установления: *а* – для различных концентраций примеси в активной области ДХ при отсутствии емкостной нагрузки; *б* – для различных величин емкостной нагрузки в контактах

Анализ представленных на рис. 2, а характеристик показал, что при ступенчатом изменении индукции магнитного поля от 0 до 100 мТ время восстановления увеличивается с уменьшением концентрации примеси в *n*-кармане. Время достижения устойчивого напряжения составило 4,72, 9,41 и 24 нс для ДХ с концентрацией примеси в активной области 10^{17} , $5 \cdot 10^{16}$ и $2 \cdot 10^{16}$ см^{-3} соответственно.

На рис. 2, б представлено сравнение времен восстановления для различных значений емкостной нагрузки в контактах. Датчик реагирует быстрее с уменьшением емкостной нагрузки, демонстрируя важность интерфейса между датчиком и электронным выходным устройством. Таким образом, верхний предел полосы пропускания ДХ определяется емкостной нагрузкой [2].

На рис. 3 представлены результаты моделирования частотных зависимостей выходного напряжения ДХ при напряжении источника питания 3 В для трех значений концентрации примеси в активной области при отсутствии емкостной нагрузки (рис. 3, а), а также для различных размеров активной области (рис. 3, б).

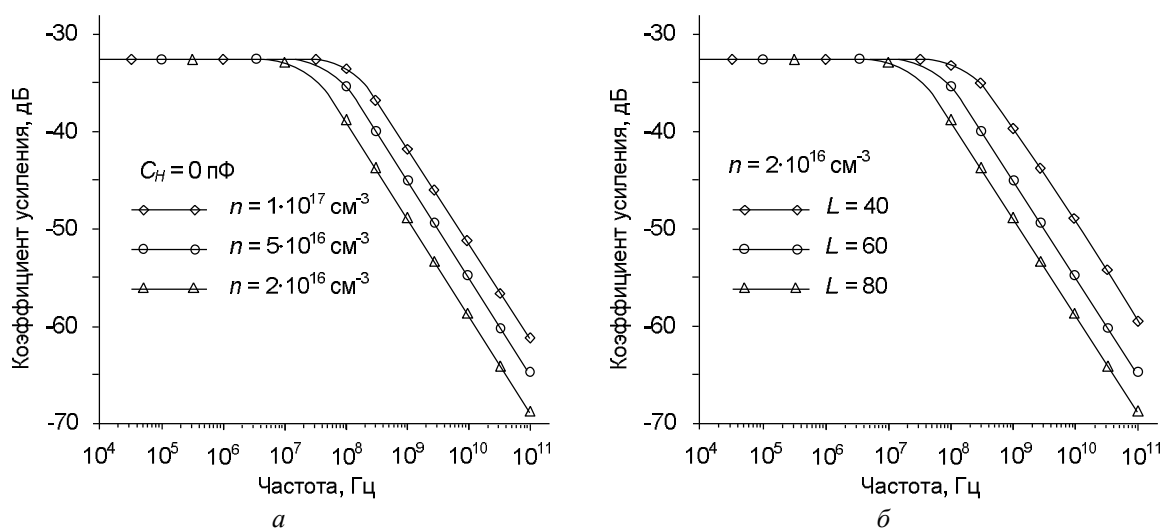


Рис. 3. Моделируемое выходное напряжение датчика Холла в зависимости от частоты: а – для различных значений концентрации примеси в активной области при отсутствии емкостной нагрузки; б – для различных размеров активной области

Показано, что уменьшение размеров активной области приводит к повышению верхнего значения полосы пропускания, которое значительно превышает 1 МГц. Установлено, что теоретическое значение верхнего предела полосы пропускания ДХ при отсутствии емкостной нагрузки и величине паразитной емкости C_0 менее 0,7 пФ составило около 100 МГц.

Для корректного моделирования динамических характеристик ДХ необходимо учитывать не только внутреннюю паразитную емкость датчика, но и емкость, обусловленную контактами – емкостную нагрузку C_H . Таким образом, суммарная емкость исследуемого ДХ выражается как $C = C_0 + C_H$. В схемотехническом решении емкостная нагрузка представляет собой дифференциальную входную емкость усилителя и паразитные емкости контактов и т. п. Результаты моделирования с учетом емкостной нагрузки показали, что верхний предел полосы пропускания ДХ составляет около 10 МГц. Результаты моделирования полосы пропускания в зависимости от размера ДХ при различных значениях концентрации в активной области представлены на рис. 4.

Установлено, что наибольшее значение верхнего предела полосы пропускания ДХ достигается (1) путем минимизации емкостной нагрузки C_H на контактах датчиков, а также (2) повышением уровня легирования активной области. Кроме того, второе решение определяет соотношение между чувствительностью и полосой пропускания ДХ, поскольку также определяет величину сопротивления между его контактами.

Выполнено моделирование временных характеристик ДХ, совмещенного на одном кристалле с дифференциальным усилителем (ДУ). На рис. 5 представлены принципиальная

схема (рис. 5, а), а также амплитудно-частотная и фазово-частотная характеристики ДУ (рис. 5, б), спроектированного на основе 180 нм КМОП технологического процесса.

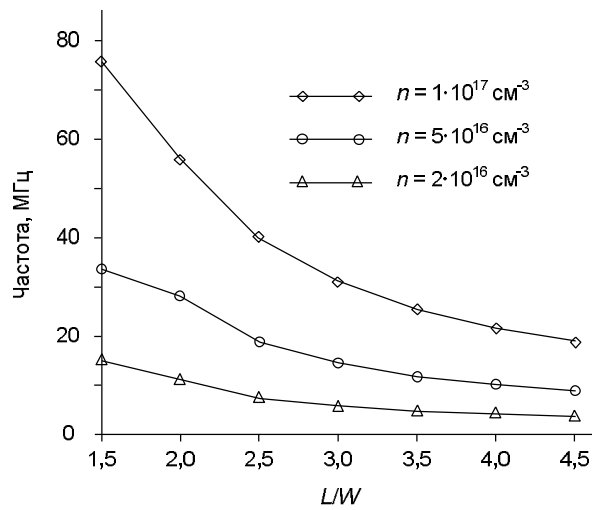


Рис. 4. Зависимость полосы пропускания от размера ДХ для разных концентраций в активной области

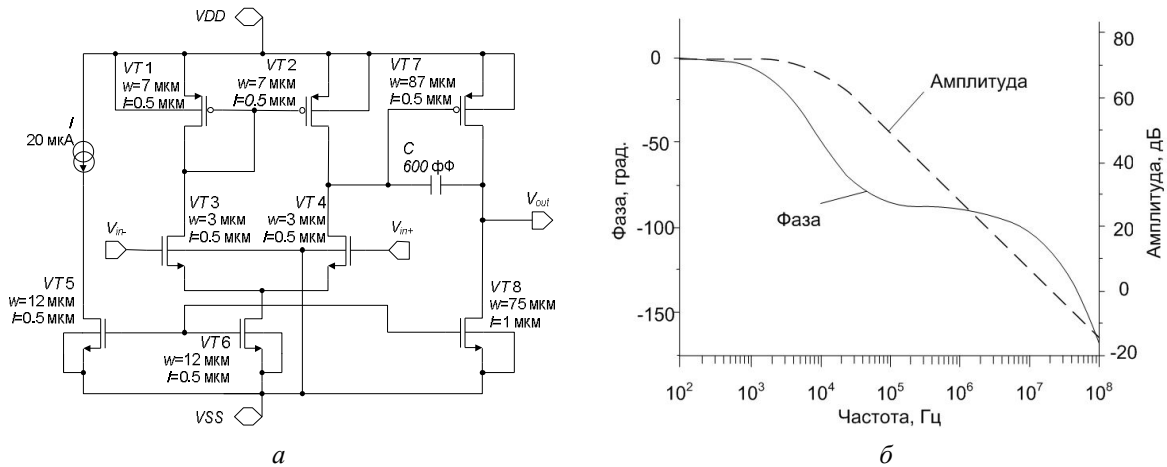


Рис. 5. Принципиальная схема (а) и амплитудно-фазовая частотная характеристика ДУ (б)

На рис. 6 представлены результаты моделирования временных характеристик схемотехнического решения на основе ДУ и ДХ. Электрические характеристики ДХ описывались соответствующей электрической моделью [13].

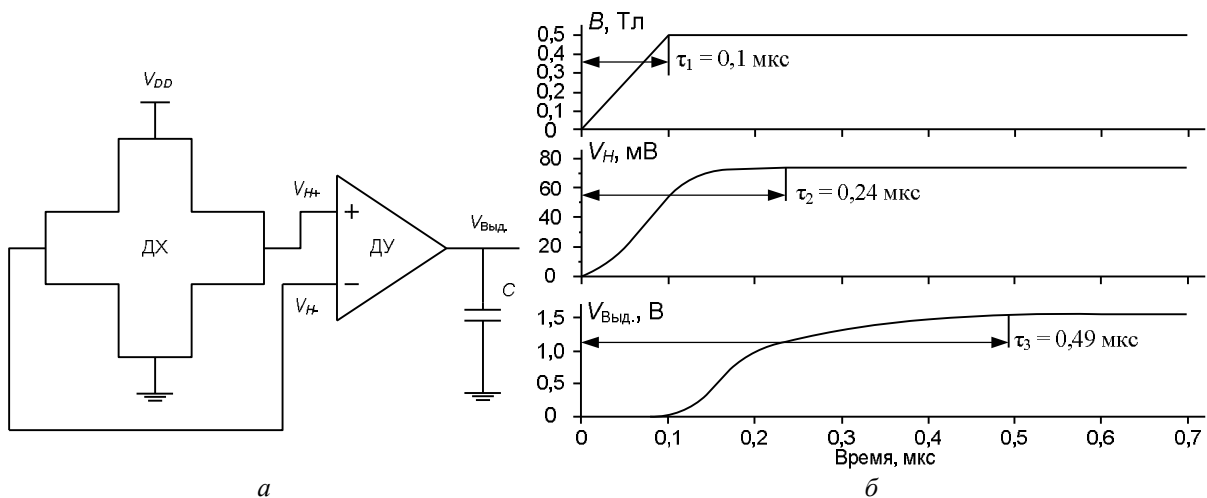


Рис. 6. ДХ со схемой обработки сигналов: а – схема; б – временные характеристики

Показано, что для исследуемой системы ДХ+ДУ напряжение Холла является экспоненциальной функцией с временем установления $\tau_3 = 0,49$ мкс, что соответствует величине суммарной емкости $C = 6,5$ пФ, при этом значения паразитной емкости C_0 и емкости контактов C_H составили 0,5 и 3 пФ соответственно. Верхний предел полосы пропускания датчика Холла равен ~ 2 МГц.

Заключение

В рамках приборно-технологического и схемотехнического моделирования кремниевого датчика Холла с целью определения его динамических характеристик получены следующие результаты.

Показано, что с уменьшением размеров активной области приводит к повышению верхнего значения полосы пропускания, которое значительно превышает 1 МГц. Установлено, что теоретическое значение верхнего предела полосы пропускания ДХ при отсутствии емкостной нагрузки и величине паразитной емкости C_0 менее 0,7 пФ составило около 100 МГц. Установлено, что для исследуемой системы ДХ+ДУ напряжение Холла является экспоненциальной функцией с временем установления $\tau_3 = 0,49$ мкс, что соответствует величине суммарной емкости $C = 6,5$ пФ, при этом значения паразитной емкости C_0 и емкости контактов C_H составили 0,5 и 3 пФ соответственно. Верхний предел полосы пропускания датчика Холла равен ~ 2 МГц.

Показано, что наибольшее значение верхнего предела полосы пропускания ДХ достигается путем минимизации емкостной нагрузки C_H на контактах датчиков, а также повышением уровня легирования активной области. Кроме того, уровень легирования определяет соотношение между чувствительностью и полосой пропускания ДХ, поскольку также определяет величину сопротивления между его контактами.

Список литературы

1. Bandwidth limits in Hall effect based current sensors / C. Marco [et al.] // Acta Imeko. 2017. Vol. 6, No. 4. P. 17–24.
2. Crescentini M., Romani A., Sangiorgi E. Physical simulations of response time in Hall sensor devices // Ultimate Integration on Silicon (ULIS). 2014. P. 89–92.
3. Optimum Design Rules for CMOS Hall Sensors / M. Crescentini [et al.] // Sensors. 2017. Vol 17. P. 1–13.
4. MLX91208, 250 kHz Programmable IMC-Hall Current Sensor [Electronic resource]. URL: <https://www.melexis.com/-/media/files/documents/datasheets/mlx91208-datasheet-melexis.pdf> (access date: 16.05.2018).
5. ACS709, High-Bandwidth, Fast Fault Response Current Sensor IC in Thermally Enhanced Package [Electronic resource]. URL: <https://www.allegromicro.com/en/Products/Current-Sensor-ICs/Zero-To-Fifty-Amp-Integrated-Conductor-Sensor-ICs/ACS709/ACS709-Frequently-Asked-Questions.aspx> (access date: 16.05.2018).
6. Allegro A1363 [Electronic resource]. – URL: <http://allegromicro.com/en/Products/Current-Sensor-ICs/SIP-Package-Zero-To-Thousand-Amp-Sensor-ICs/A1363.aspx>.
7. Popovic R. Hall Effect Devices. CRC Press, Boca Raton (FL). 2004. 426 p.
8. Дао Динь Ха, Стемпицкий В.Р. Исследование характеристик датчика холла с различной геометрией активной области // Нано- и микросистемная техника. 2018. Т. 20, № 3. С. 174–186.
9. Paun M., Sallèse J., Kayal M. Comparative Study on the Performance of Five Different Hall Effect Devices // Sensors. 2013. Vol. 13. P. 2093–2112.
10. Абрамов И. Моделирование элементов интегральных схем: учеб. пособие. Минск: Изд. БГУ, 1999. 92 с.
11. Нелаев В., Стемпицкий В. Основы САПР в микроэлектронике. Моделирование технологии и прибора. Минск: БГУИР, 2008. 220 с.
12. Silvaco [Electronic resource]. – URL: <https://www.silvaco.com> (access date: 16.05.2018).
13. Dao Dinh Ha, Stempitsky V., Tran Tuan Trung. Verilog-A compact model of the silicon Hall element // Integrated Circuits, Design, and Verification. 2017. P. 41–46.

References

1. Bandwidth limits in Hall effect based current sensors / C. Marco [et al.] // Acta Imeko. 2017. Vol. 6, No. 4. P. 17–24.
2. Crescentini M., Romani A., Sangiorgi E. Physical simulations of response time in Hall sensor devices // Ultimate Integration on Silicon (ULIS). 2014. P. 89–92.

3. Optimum Design Rules for CMOS Hall Sensors / M. Crescentini [et al.] // Sensors. 2017. Vol 17. P. 1–13.
4. MLX91208, 250 kHz Programmable IMC-Hall Current Sensor [Electronic resource]. – URL: <https://www.melexis.com/-/media/files/documents/datasheets/mlx91208-datasheet-melexis.pdf> (access date: 16.05.2018).
5. ACS709, High-Bandwidth, Fast Fault Response Current Sensor IC in Thermally Enhanced Package [Electronic resource]. URL: <https://www.allegromicro.com/en/Products/Current-Sensor-ICs/Zero-To-Fifty-Amp-Integrated-Conductor-Sensor-ICs/ACS709/ACS709-Frequently-Asked-Questions.aspx> (access date: 16.05.2018).
6. Allegro A1363 [Electronic resource]. URL: <http://allegromicro.com/en/Products/Current-Sensor-ICs/SIP-Package-Zero-To-Thousand-Amp-Sensor-ICs/A1363.aspx>.
7. Popovic R. Hall Effect Devices. CRC Press, Boca Raton (FL). 2004. 426 p.
8. Dao Din' Ha, Stempickij V.R. Issledovanie harakteristik datchika holla s razlichnoj geometrijej aktivnoj oblasti // Nano- i mikrosistemnaja tehnika. 2018. T. 20, № 3. S. 174–186. (in Russ.)
9. Paun M., Sallese J., Kayal M. Comparative Study on the Performance of Five Different Hall Effect Devices // Sensors. 2013. Vol. 13. P. 2093–2112.
10. Abramov I. Modelirovanie jelementov integral'nyh shem: ucheb. posobie. Minsk: Izd. BGU, 1999. 92 s. (in Russ.)
11. Nelaev V., Stempickij V. Osnovy SAPR v mikroelektronike. Modelirovanie tehnologii i pribora. Minsk: BGUIR, 2008. 220 s. (in Russ.)
12. Silvaco [Electronic resource]. – URL: <https://www.silvaco.com> (access date: 16.05.2018).
13. Dao Dinh Ha, Stempitsky V., Tran Tuan Trung. Verilog-A compact model of the silicon Hall element // Integrated Circuits, Design, and Verification. 2017. P. 41–46.

Сведения об авторах

Дао Динь Ха, аспирант кафедры микро- и нанозлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Стемпицкий В.Р., к.т.н., доцент, доцент кафедры микро- и нанозлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-88-90;
e-mail: vstem@bsuir.by
Стемпицкий Виктор Романович

Information about the authors

Dao Dinh Ha, PG student of micro- and nanoelectronics department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Stempitsky V.R., PhD, associate professor, associate professor of the department of micro- and nanoelectronics of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka st., 6,
Belarusian state university
of informatics and radioelectronics
tel. +375-17-293-88-90;
e-mail: vstem@bsuir.by
Stempitsky Viktor Romanovich