

Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 681.586:621.315.592

ДАО
Динь Ха

**ПРИБОРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ИНТЕГРАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ ХОЛЛА НА ОСНОВЕ
КРЕМНИЯ, АНТИМОНИДА ИНДИЯ И НИТРИДА ГАЛЛИЯ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные
компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах

Минск 2018

Научная работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Научный руководитель **Стемпичкий Виктор Романович**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры микро- и наноэлектроники учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Официальные оппоненты: **Мухуров Николай Иванович**, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией микро- и наносенсорики государственного научно-производственного объединения «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»

Гулай Анатолий Владимирович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Интеллектуальные системы» Белорусского национального технического университета

Оппонирующая организация Открытое акционерное общество «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»

Защита состоится 27 сентября 2018 г. в 16.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.03 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, тел. 293-89-89, e-mail: dissovet@bsuir.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан « ____ » августа 2018 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций
кандидат технических наук, доцент

И. В. Дайняк

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время успешно развиваются новые научные направления, связанные с созданием интегрированных микро- и наноэлектронных сенсорных устройств в интегральном исполнении для различных отраслей экономики, обеспечивающих возможности контроля широкого перечня физических, химических и биологических параметров. Широкое применение в сенсорной технике имеют датчики, используемые для измерения индукции магнитного поля и бесконтактного определения различных воздействий. Наиболее распространенным типом магниточувствительных элементов являются датчики, принцип действия которых основан на эффекте Холла, то есть возникновении поперечной разности потенциалов при протекании тока по проводнику, находящемуся в поперечном магнитном поле, – датчики Холла (ДХ). Относительная простота конструкции и применение стандартных технологических процессов для изготовления ДХ поставили их на первое место по сравнению с другими преобразователями магнитного поля.

С учетом этого проблема создания новых и усовершенствования существующих конструктивных решений датчиков, а также поиска материалов и технологий для их изготовления представляется весьма актуальной.

Основой чувствительных элементов датчиков является вещество (материал), которое воспринимает и преобразует анализируемую физическую величину. Базовыми материалами, используемыми при изготовлении ДХ, являются кремний (Si), арсенид галлия (GaAs) и антимонид индия (InSb), а в последние годы – широкозонные полупроводники – в частности, гетероструктуры на основе нитрида галлия (GaN).

Оптимизация конструктивных и эксплуатационных параметров, анализ эффективности применения новых материалов возможны только с использованием современных средств компьютерного моделирования технологических процессов и приборных структур микроэлектроники и сенсорики. Важно обеспечить не только возможность моделирования технологии изготовления и электрических характеристик ДХ, но и исследовать основные эффекты, возникающие в процессе их эксплуатации, а также проектировать схемотехнические решения на основе сенсорных устройств.

Актуальной является задача разработки методов и моделей для схемотехнического моделирования эксплуатационных характеристик ДХ с целью последующего создания интегрированных сенсорных систем, состоящих из датчика, малошумящего усилителя, аналого-цифрового преобразователя и обеспечивающих точную обработку входных данных, а также их преобразование в цифровой сигнал.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами, темами

Работа выполнялась в рамках обеспечения решения задач Государственных программ научных исследований (ГПНИ) и хозяйственных договоров:

– Задание 1.8.05 ГПНИ «Информатика, космос и безопасность» на тему «Разработка конструкции и технологии изготовления биосенсоров на базе транзисторов с высокой подвижностью электронов для использования в качестве элементной базы исследования *in vitro* предикторов токсических свойств наночастиц», 2016–2018, № ГР 20163743.

– Задание 3.1.02 ГПНИ «Фотоника, опто- и микроэлектроника» на тему «Разработка физико-топологических моделей описания воздействия ионизирующих излучений на характеристики приборных структур и интегральных микросхем специального назначения», 2016–2018, № ГР 20164342.

– Договор с НИУ «Институт ядерных проблем» БГУ № 16-1173 на тему «Разработать с использованием современных средств САПР компании Cadence и изготовить экспериментальные образцы аналого-цифровых интегральных микросхем», 2016–2018, № ГР 20170161.

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является разработка принципов построения и электрических моделей интегральных датчиков Холла и магниточувствительных сенсорных устройств, изготовленных с применением стандартной кремниевой технологии, на основе антимонида индия и нитрида галлия, а также методов компьютерного моделирования конструктивных и схемотехнических решений, предназначенных для использования в современных информационно-аналитических системах.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Проанализировать области применения, характеристики, особенности функционирования и компьютерного моделирования современных магниточувствительных сенсорных устройств.

2. Разработать технологические маршруты формирования приборных структур датчиков Холла на основе кремния, антимонида индия и нитрида галлия, предназначенные для компьютерного моделирования и оптимизации их эксплуатационных характеристик.

3. Разработать обобщенную электрическую модель, предназначенную для схемотехнического моделирования магниточувствительных сенсорных устройств, функционирующих на эффекте Холла, с учетом их конструктивных особенностей и используемых материалов.

4. Выполнить компьютерное моделирование и оптимизацию эксплуатационных характеристик датчиков Холла на основе кремния, антимонида индия и нитрида галлия с учетом особенностей используемых материалов, геометрических и конструктивных (интегрированный магнитный концентратор) параметров.

5. Разработать схемотехнические решения для обработки сигналов исследуемых датчиков Холла и провести тестирование рассматриваемых сенсорных устройств.

Объект исследования: датчики Холла в интегральном исполнении, изготовленные на основе кремния, антимонида индия и нитрида галлия.

Предмет исследования: эксплуатационные характеристики датчиков Холла, оцениваемые с учетом особенностей используемой технологии изготовления, применяемых материалов, геометрических и конструктивных (интегрированный магнитный концентратор) параметров.

Научная новизна

1. Показана возможность разработки с использованием средств приборно-технологического проектирования интегральных микросхем (ИМС) конструкций интегральных датчиков Холла с высокой абсолютной чувствительностью, функционирующих при низких (до $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$) и высоких (до $400\text{ }^{\circ}\text{C}$) температурах, где в качестве материала активной области применяются соответственно пленки антимонида индия (InSb) и гетероструктуры на основе нитрида галлия.

2. Предложенный и исследованный в рамках приборно-технологического моделирования подход к реализации сенсорной системы на основе четырех кремниевых датчиков Холла с интегрированным магнитным концентратором дискообразной формы из супермендюра с высоким уровнем индукции магнитного насыщения и низкой остаточной намагниченностью позволяет проектировать устройства с высоким коэффициентом усиления магнитного потока, предназначенные для детектирования слабых магнитных полей.

3. Реализованная на языке описания аналоговой аппаратуры Verilog-A обобщенная электрическая модель, отличающаяся учетом типа материала и особенностей конструкции устройства, обеспечивает адекватное описание статических и динамических характеристик кремниевых и нитрид-галлиевых

датчиков Холла, а также сенсорных систем с интегрированным магнитным концентратором.

Положения, выносимые на защиту

1. Конструкция датчика Холла с активной областью 60×20 мкм на основе пленки антимонида индия (InSb) толщиной 1 мкм, обладающего высокой подвижностью носителей заряда и низкой нелинейностью в зависимости напряжения Холла от температуры, обеспечивает возможность функционирования при температурах до -200 °С и имеет величину абсолютной чувствительности до 1,8 В/Тл, что в 6 раз выше по сравнению со структурами, активная область которых сформирована на основе кремния.

2. Конструкция датчика Холла, реализованная на основе гетероструктуры $\text{Al}_{0,24}\text{Ga}_{0,76}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}/\text{Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{N}/\text{AlN}$ толщиной 2 мкм с соотношением длины к ширине активной области 2,5, сформированная на сапфировой подложке, обеспечивает максимальное значение магнитной чувствительности по току до 72,5 В/(А·Тл) и величину температурного коэффициента магнитной чувствительности 0,0273 %/°С, что дает возможность работы данного устройства в диапазоне температур от 25 до 400 °С.

3. Конструктивное решение сенсорной системы, состоящей из четырех перпендикулярно расположенных кремниевых датчиков Холла с интегрированным магнитным концентратором дискообразной формы диаметром 200 мкм, толщиной 10 мкм и краевым углом, отсчитываемым от нормали к основанию дискового концентратора 60 град, изготовленным из супермендюра с уровнем индукции магнитного насыщения до 2,8 Тл и низкой остаточной намагниченностью, обеспечивает коэффициент усиления магнитного потока 10,81 при величине индукции внешнего магнитного поля 120 мТл и может использоваться для детектирования магнитных полей с индукцией от 0,01 до 2,0 мТл.

4. Обобщенная электрическая модель, реализованная на языке Verilog-A, предназначенная для математического описания статических и динамических характеристик кремниевых и нитрид-галлиевых датчиков Холла, а также сенсорных систем с интегрированным магнитным концентратором, отличающаяся учетом типа материала и особенностей конструкции, обеспечивает возможности схемотехнического моделирования данного типа устройств в программных комплексах проектирования интегральных микросхем с относительной погрешностью ± 10 % по сравнению с результатами моделирования с использованием моделей переноса носителей заряда.

Личный вклад соискателя ученой степени

Содержание диссертационной работы отражает личный вклад автора, заключающийся в разработке новых, научно обоснованных, проверенных на практике подходов к описанию эксплуатационных характеристик датчиков Холла с учетом используемых материалов активной области, геометрических и конструктивных (магнитный концентратор) параметров, а также методов схемотехнического моделирования с использованием соответствующих электрических моделей. Совместно с научным руководителем канд. техн. наук, доц. В. Р. Стемпицким определены структура, цели и задачи исследования, обобщены основные научные результаты. Совместно с соавторами публикаций осуществлялась подготовка и проведение исследований, обсуждались полученные результаты.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные результаты диссертационных исследований докладывались и обсуждались на следующих международных и республиканских научно-технических конференциях и семинарах: Международная научно-практическая конференция «Физика конденсированного состояния – ФКС-XXIII», Гродно, Беларусь, 2015; XIII, XIV, XV Белорусско-российские научно-технические конференции «Технические средства защиты информации», Минск, Беларусь, 2015, 2016, 2017; International Conference on Advanced Technologies for Communications – ATC, Ho Chi Minh City, Vietnam, 2015; Республиканская студенческая научно-техническая конференция БНТУ, Минск, Беларусь, 2015, 2016. International Conference on Integrated Circuits Design and Verification – ICDV, Ha Noi City, Vietnam, 2017; International Workshop on New Approaches to High-Tech: Nano-Design, Technology, Computer Simulations – NDTCS, Minsk, Belarus, 2017; Международный научно-технический семинар «Телекоммуникации: Сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных», Минск, Беларусь, 2017; Международная крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КРЫМИКО-2018), Севастополь, 2018.

Результаты диссертационных исследований переданы для практического использования в ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» и в Ассоциацию радиоэлектроники Вьетнама (The Radio-and Electronics Association of Vietnam); внедрены в учебный процесс кафедры микро- и наноэлектроники БГУИР и кафедры «Интеллектуальные системы» Белорусского национального технического университета.

Опубликование результатов диссертации

Основные результаты диссертационных исследований опубликованы в 19 научных работах общим объемом 4,8 авторского листа. Из них 6 статей объемом 2,7 авторского листа в рецензируемых научных журналах в соответствии с пунктом 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, 8 публикаций в материалах и сборниках трудов научных конференций объемом 1,8 авторского листа, 5 тезисов докладов на научных конференциях объемом 0,3 авторского листа.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, 4 глав, заключения, библиографического списка и 3 приложений.

Общий объем диссертационной работы составляет 137 страниц, из них 81 страница основного текста, 58 рисунков на 21 странице, 21 таблица на 6 страницах, библиографический список из 78 наименований на 6 страницах, список публикаций автора из 19 наименований на 3 страницах, 3 приложения на 20 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В **первой главе** исследовано современное состояние и тенденции развития датчиков магнитного поля, определены требования к основным характеристикам, определяющим области их применений. Проанализированы параметры материалов изготовления ДХ: кремния (Si), германия (Ge), арсенида и антимонида индия (InAs и InSb), арсенида галлия (GaAs), гетероструктур на основе широкозонных полупроводников (SiC, GaN, AlN, InN), а также эффективность реализации конструктивных решений для систем на основе ДХ с интегрированным магнитным концентратором (ИМК). Описаны методы исследования частотных характеристик ДХ и подходы к схемотехническому моделированию систем обработки данных сенсорных устройств.

Во **второй главе** представлено описание физических процессов, происходящих в приборных структурах, функционирующих на эффекте Холла, а также используемых в рамках диссертационных исследований методов и программных средств моделирования технологических процессов и электрических характеристик ДХ. Описаны результаты компьютерного моделирования в программном комплексе компании Silvaco предложенных технологических маршрутов изготовления ДХ с использованием стандартной кремниевой технологии, технологии «кремний на изоляторе» и на основе широкозонных полупроводников (гетероструктуры на основе GaN).

Предложена эквивалентная схема ДХ, построенная на основе стандартных подкомпонентов (нелинейных сопротивлений, источников напряжения, управляемых током, и т. п.) и не использующая для описания сложных уравнений физических процессов в его структуре, которая обеспечивает возможность учета гальваномагнитного и температурного эффектов (рисунок 1).

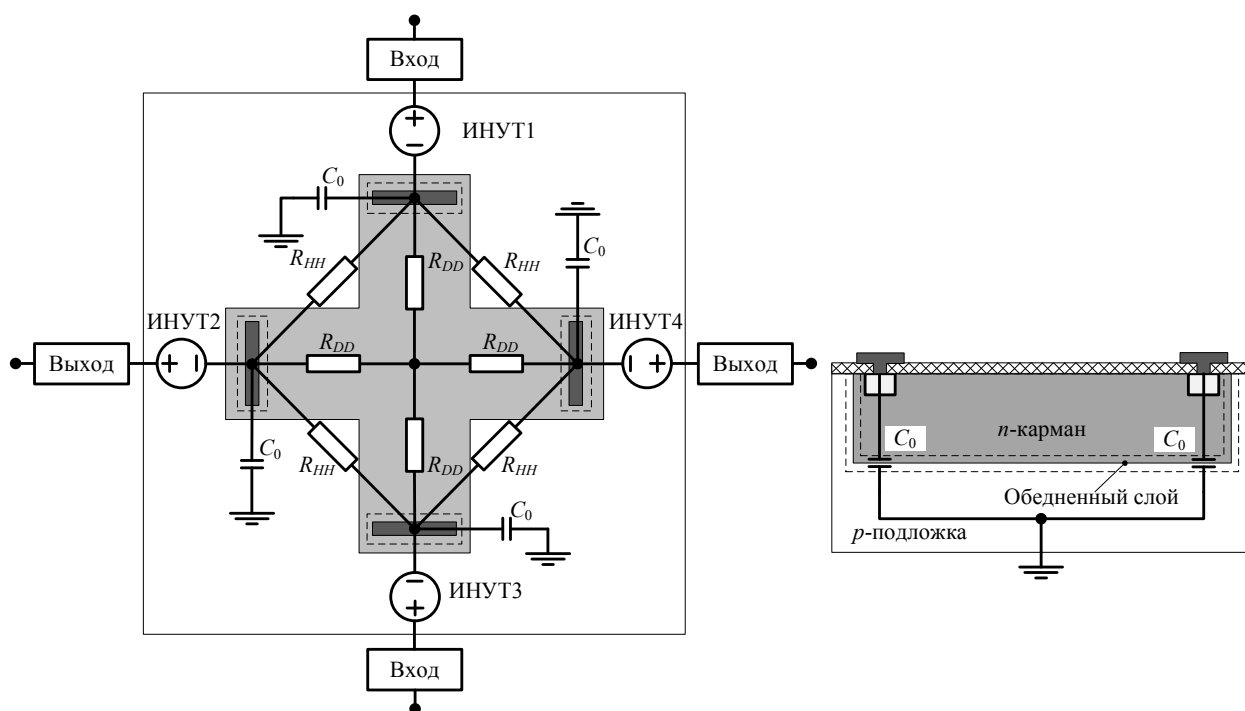


Рисунок 1. – Эквивалентная схема ДХ для реализации обобщенной электрической модели на языке Verilog-A

Эквивалентная схема имеет четыре электрических вывода и включает следующие компоненты:

- восемь нелинейных резисторов, предназначенных для описания зависимостей характеристик ДХ от магнитного поля и температуры;
- четыре источника напряжения, управляемых током (ИНУТ), которые позволяют оценить вклады в напряжение Холла токов, протекающих через нелинейные сопротивления;
- четыре интерфейсных блока для моделирования последовательных сопротивлений.

Предложена и реализована на языке описания аналоговой аппаратуры Verilog-A обобщенная электрическая (компактная) модель ДХ, учитывающая особенности конструкции и используемых для его изготовления материалов, которая позволяет проводить схемотехническое моделирование устройств, имеющих в составе ДХ, сформированные по стандартной кремниевой технологии, на основе широкозонных полупроводников и сенсорных решений

ДХ с ИМК. Состав и структура электрической модели, включая наименование соответствующих параметров, представлены на рисунке 2.

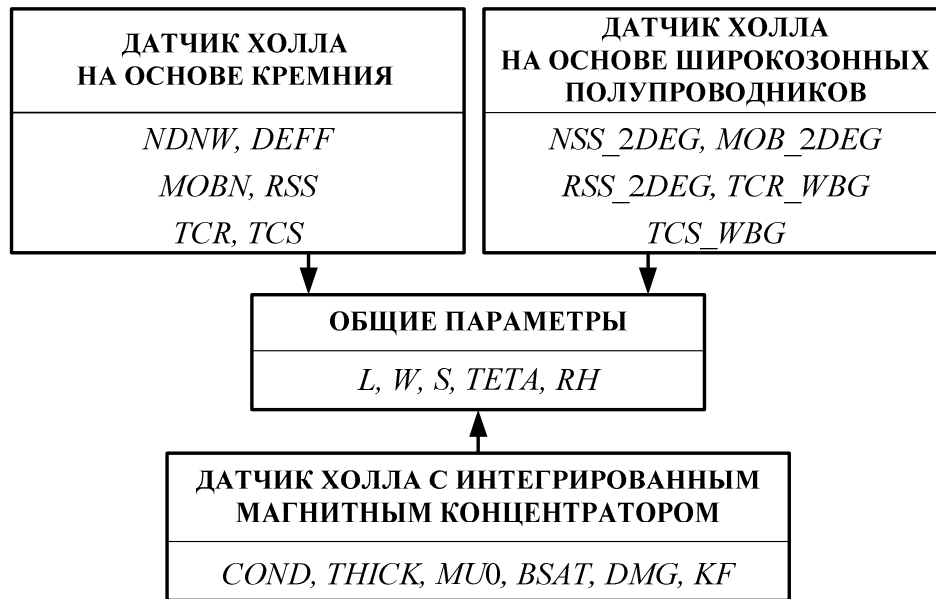


Рисунок 2. – Состав и структура обобщенной электрической модели ДХ

В третьей главе описаны результаты исследования и оптимизации конструктивно-технологических параметров ДХ и систем на их основе. Исследованы характеристики ДХ, изготовленных с использованием соединений III–V групп, а также гетероструктур на основе нитрида галлия. На рисунке 3 представлена конструкция датчика Холла на основе InSb.

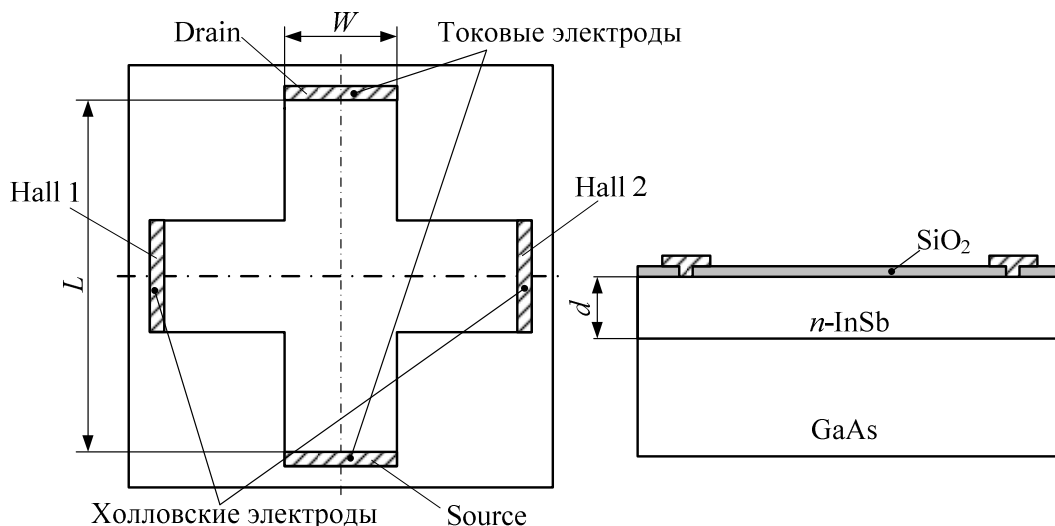
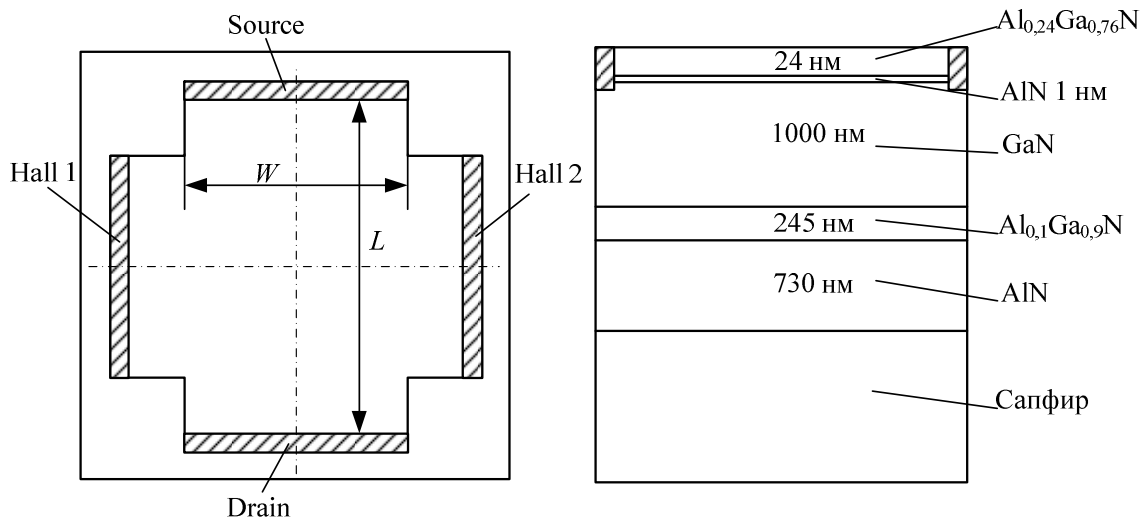


Рисунок 3. – Конструкция ДХ на основе антимонида индия

Показано, что ДХ с активной областью из материалов с большим значением подвижности, в частности антимонида индия (InSb), обладает более высокой (до 6 раз по сравнению с кремниевыми ДХ) магнитной чувствительностью и обеспечивает возможности функционирования при температурах до $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Исследованы эксплуатационные характеристики ДХ на основе гетероструктуры $\text{Al}_{0,24}\text{Ga}_{0,76}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}/\text{Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{N}/\text{AlN}$ с диапазоном рабочих температур от 25 до 400 °С, конструкция которого представлена на рисунке 4.



1, 2 – токовые электроды; 3, 4 – холловские электроды
Рисунок 4. – Конструкция ДХ на основе нитрида галлия

На рисунке 5 представлена зависимость чувствительности по току датчика Холла от температуры при значении магнитного поля $B = 0,1$ Тл и входного тока $I = 1,0$ мА.

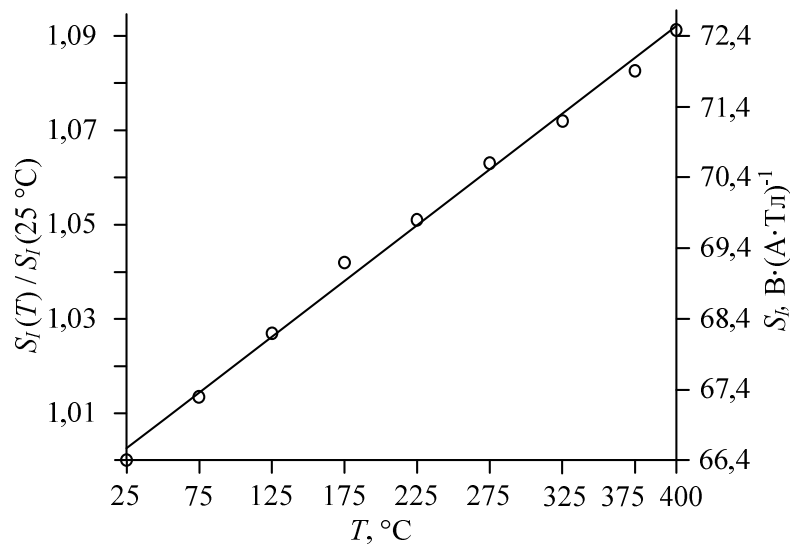


Рисунок 5. – Зависимость чувствительности ДХ по току от температуры

На рисунке 6 представлены зависимости концентрации и подвижности носителей заряда от температуры. Магнитная чувствительность по току изменяется от 66,4 до 72,5 В/(А·Тл) при температуре от комнатной до 400 °С. Величина температурного коэффициента магнитной чувствительности по току составляет 0,0273 %/°С, что свидетельствует о высокой эффективности

предлагаемой конструкции по сравнению с традиционными решениями датчиков Холла в диапазоне низких температур.

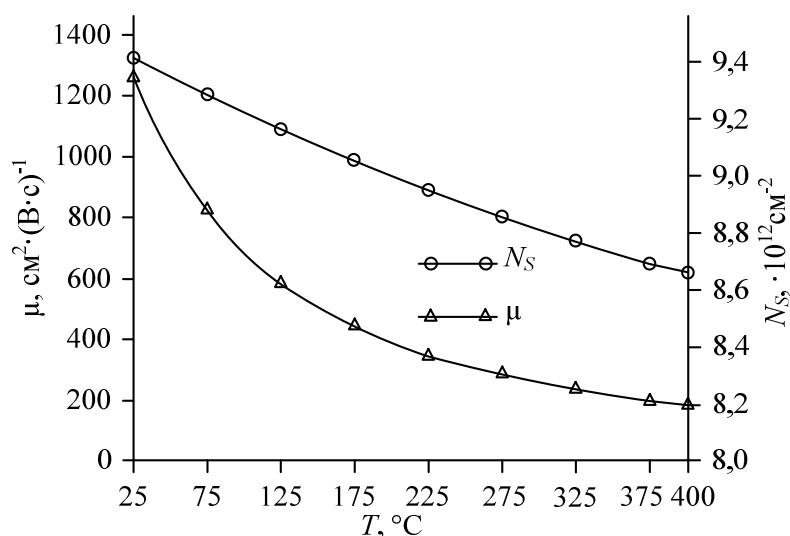


Рисунок 6. – Зависимости подвижности и концентрации электронов от температуры

Малая зависимость магнитной чувствительности от температуры в структуре обусловлена уникальными транспортными свойствами гетероперехода AlGaIn/GaN. Изменение рабочей температуры приводит к уменьшению примерно на 8 % плотности носителей заряда, что объясняет незначительное увеличение магнитной чувствительности по току S_I .

Проведено моделирование сенсорной системы (рисунок 7), состоящей из четырех ДХ и ИМК, сформированных на кремниевой подложке.

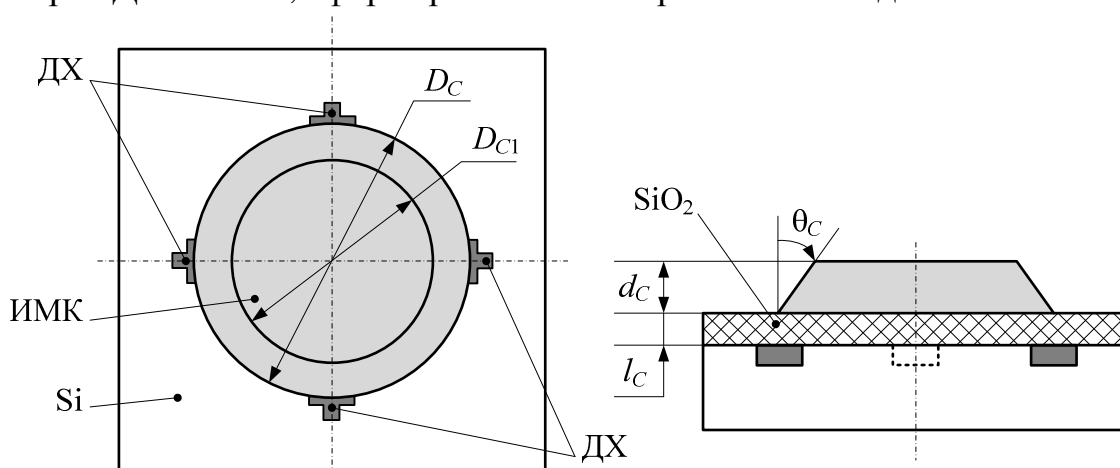


Рисунок 7. – Магниточувствительный сенсор с ИМК дискообразной формы

ДХ располагаются перпендикулярно относительно друг друга по краям ИМК. Между ИМК и ДХ расположен слой диэлектрика толщиной l_c . ИМК представляет собой диск из ферромагнитного материала с наружным диаметром D_c и внутренним D_{c1} , толщиной d_c и краевым углом, отсчитываемым от нормали к основанию дискового концентратора θ_c .

В качестве материала ИМК выбран супермендюр, обладающий высокой индукцией магнитного насыщения $B_S = 2,8$ Тл.

Показано, что интеграция ИМК дискообразной формы из супермендюра в сенсорную систему на основе четырех ДХ 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).

В четвертой главе описаны результаты исследования динамических характеристик и обобщенной электрической модели ДХ, а также схмотехнического моделирования системы для приема, усиления и обработки данных сенсорных устройств «Датчик Холла – схема обработки сигнала».

В рамках исследования частотных характеристик ДХ установлено, что наибольшее значение верхнего предела полосы пропускания достигается либо путем минимизации емкостной нагрузки C_L на контактах датчиков, либо повышением уровня легирования активной области. При этом второе решение определяет соотношение между чувствительностью и полосой пропускания ДХ, поскольку определяет величину сопротивления между его контактами.

Сравнение результатов приборно-технологического моделирования в программном комплексе Silvaco с данными схмотехнического моделирования с использованием электрической модели в программном комплексе Cadence для ДХ, изготовленного по кремниевой технологии и на основе нитрида галлия, соответственно приведено на рисунках 8 и 9. Относительная ошибка данных моделирования не превышает $\pm 10\%$.

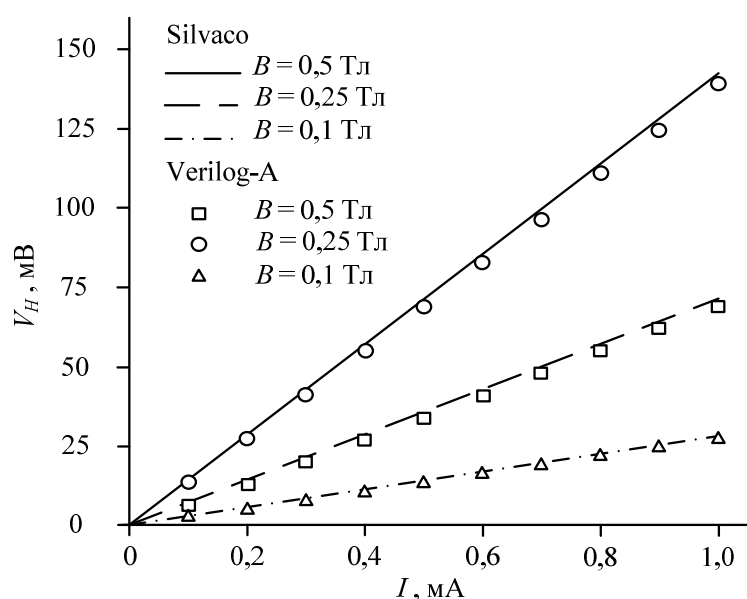


Рисунок 8. – Зависимость напряжения Холла кремниевого ДХ от тока источника питания при различной величине магнитного поля

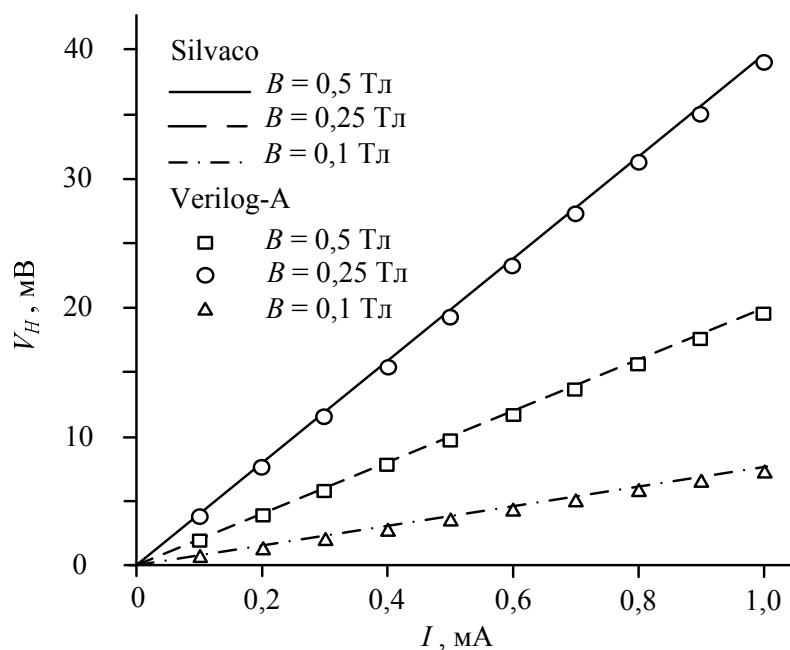


Рисунок 9. – Зависимость напряжения Холла нитрид-галлиевого ДХ от тока источника питания при различной величине магнитного поля

На рисунке 10 представлена схема реализации системы для приема, усиления и обработки сенсорных данных на основе кремния, состоящая из датчика, дифференциального усилителя (ДУ), буферного усилителя (БУ), аналого-цифрового преобразователя (АЦП) последовательного приближения и других компонентов.

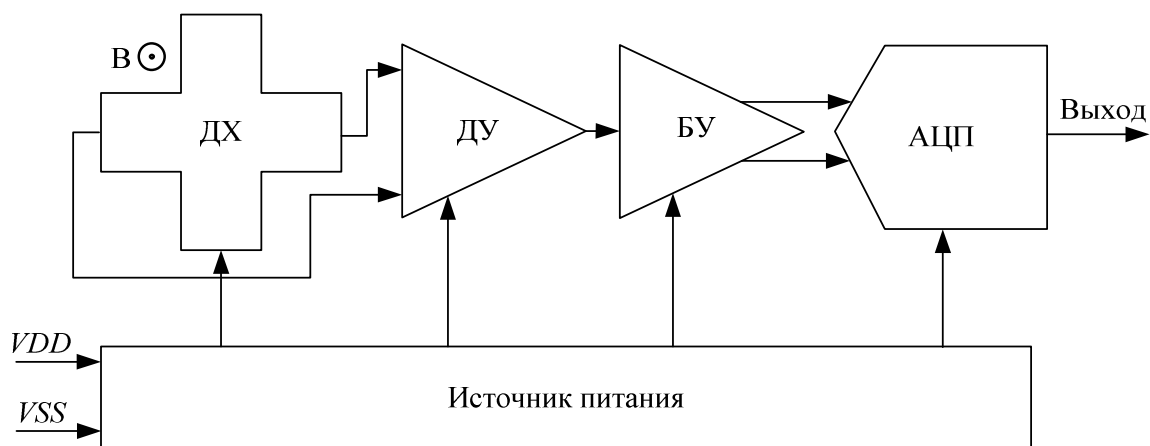


Рисунок 10. – Система для приема, усиления и обработки данных сенсорных устройств

Для исследуемой системы с использованием библиотеки проектирования TSMC 0,18 мкм CMOS MS/RF 1,8/3,3V PDK разработано топологическое представление. Данные компьютерного моделирования предложенного схемотехнического решения (рисунок 11) показали высокую эффективность разработанной электрической модели датчика, а также хорошее соответствие

полученных результатов функциональным параметрам компонентов схемы обработки сигналов.

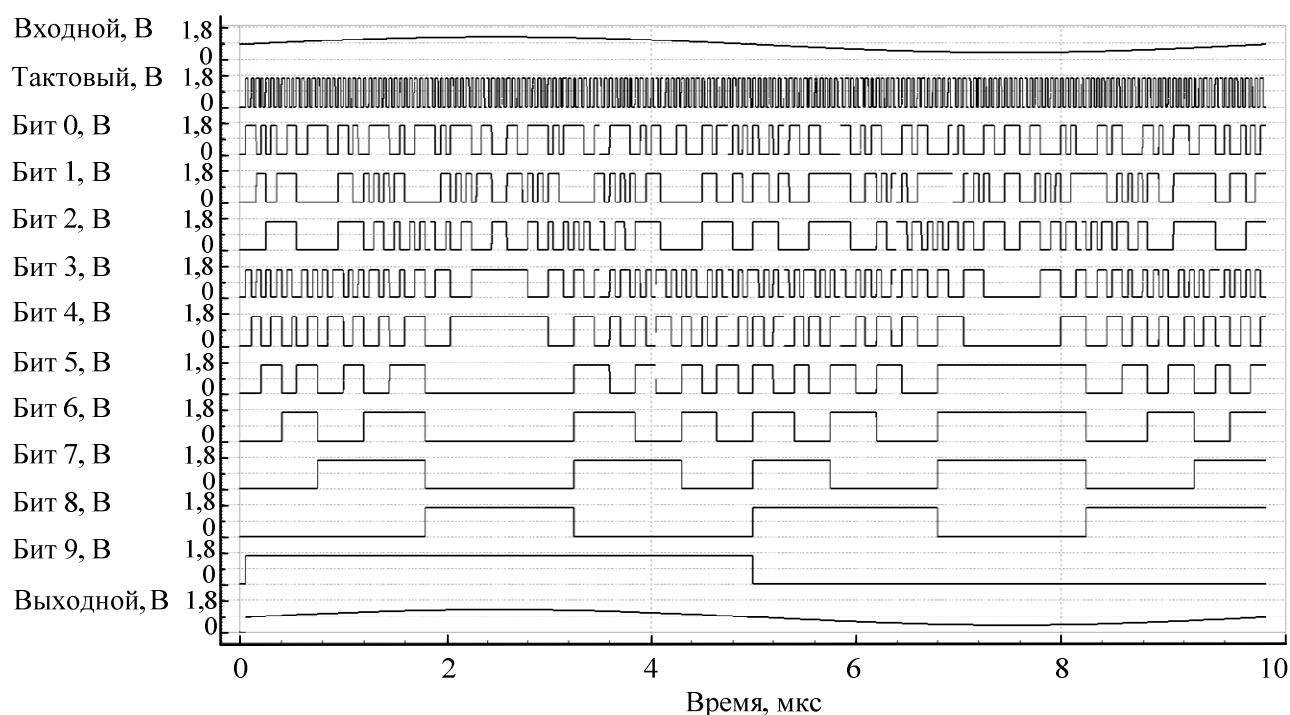


Рисунок 11. – Результаты компьютерного моделирования системы приема, усиления и обработки данных кремниевого датчика Холла

В приложениях представлены листинги и краткое описание заданий на моделирование технологии изготовления и характеристик ДХ в программном комплексе компании Silvaco, листинг программного кода обобщенной электрической модели ДХ на языке Verilog-A, а также акты использования и внедрения результатов исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. По результатам анализа научных и патентных источников, а также собственных данных приборно-технологического моделирования установлено, что высокие эксплуатационные характеристики ДХ могут быть обеспечены только на основе применения новых материалов конструктивных и технологических решений для их создания, а также путем использования современных методов компьютерного проектирования и оптимизации элементной базы сенсорики [1, 3, 5, 7–9, 11, 15–19], в частности:

– применение в качестве активной области ДХ полупроводниковых материалов III–V групп, обладающих высокой подвижностью носителей заряда, в частности – антимонида индия (InSb), имеющего низкую нелинейность зависимости напряжения Холла от температуры, обеспечивает значительное,

до 6 раз увеличение абсолютной чувствительности по сравнению со структурами, активная область которых сформирована на основе кремния, а также высокую чувствительность магнитного поля при низких, до $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$, температурах [7, 8, 15, 16];

– использование гетероструктур на основе нитрида галлия в качестве материала ДХ позволяет значительно расширить верхний диапазон рабочих температур. Данные компьютерного моделирования ДХ на основе гетероструктуры AlGaIn/GaN при высоких температурах показали, что магнитная чувствительность по току достигает значения $S_I = 66,4\text{ В}/(\text{А}\cdot\text{Тл})$ при соотношении $L/W = 2,5$. При повышении отношения длины к ширине до 3 изменение составляет 2,5 %. Установлено, что магнитная чувствительность предлагаемой конструкции ДХ стабильна в диапазоне температур от $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($S_I = 66,4\text{ В}/(\text{А}\cdot\text{Тл})$) до $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($S_I = 72,5\text{ В}/(\text{А}\cdot\text{Тл})$), при этом величина температурного коэффициента магнитной чувствительности составила $0,0273\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ [1, 3, 9, 11, 17, 18];

– включение в конструкцию ДХ концентратора магнитного потока; обеспечивает возможность измерения слабых магнитных полей (от $0,01\text{ мТл}$ до $2,0\text{ мТл}$), увеличивая на 1–3 порядка их магнитную чувствительность без ухудшения шумовых характеристик и временной стабильности, и позволяет измерить три компоненты магнитного поля (по осям X, Y, Z) [5, 19].

2. Результаты тестирования обобщенной электрической модели ДХ для кремниевого и нитрид-галлиевого датчика показали, что погрешность моделирования характеристик исследуемых конструкций датчиков не превышает 10 % по сравнению с результатами приборно-технологического моделирования с использованием моделей переноса носителей заряда [6, 10, 12–14].

3. В рамках исследования влияния геометрических параметров активной области ДХ на его эксплуатационные характеристики [4]:

– показано, что для отношения длины к ширине активной области от 0 до 3 геометрический поправочный коэффициент имеет максимальное значение 0,96 при $L/W = 3$; для отношения от 3 до 5 его максимум составляет 0,99 при $L/W = 5$;

– установлено, что наибольшие значения абсолютной чувствительности $S_A = 140\text{ мВ}/\text{Тл}$ и чувствительности по току $S_I = 280\text{ В}/(\text{А}\cdot\text{Тл})$ характерны для конструкции с низкой концентрацией примесей $5,0\cdot 10^{16}\text{ см}^{-3}$, при этом прямоугольная конструкция обладает лучшей чувствительностью по напряжению $S_V = 0,048\text{ В}/(\text{В}\cdot\text{Тл})$;

– установлено, что для крестообразной конструкции влияние несоосности контактов на остаточное напряжение имеет наименьшее значение, которое

составило 2,8 мкВ. Увеличение геометрических размеров ДХ позволяет уменьшить ошибки на границах и минимизировать остаточное напряжение. Конструкция с низкой концентрацией в активной области имеет наименьшие значения остаточного магнитного поля 0,19 и 0,38 мТл при температурах 248 и 398 К соответственно.

4. Установлено, что включение ИМК дискообразной формы из ферромагнитного материала в конструкцию сенсорной системы на основе четырех ДХ обеспечивает значительное (до 10 раз) повышение коэффициента усиления магнитного потока, что позволяет применять исследуемые конструкции датчиков для детектирования слабых магнитных полей (от 0,01 до 2,0 мТл). Показано, что ИМК дискообразной формы диаметром 200 мкм, толщиной 10 мкм и краевым углом, отсчитываемым от нормали к основанию дискового концентратора 60 град из супермендюра, обеспечивает коэффициент усиления магнитного потока 10,81 при величине индукции внешнего магнитного поля 120 мТл [2, 5, 19].

5. В рамках приборно-технологического и схемотехнического моделирования кремниевого ДХ с целью определения его динамических характеристик [6]:

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

– установлено, что для исследуемой системы ДХ+ДУ напряжение Холла является экспоненциальной функцией и имеет время установления 0,49 мкс, что соответствует величине суммарной емкости 6,5 пФ, при этом значения паразитной емкости и емкости контактов составило 0,5 и 3 пФ соответственно. Верхний предел полосы пропускания ДХ равен ~2 МГц;

– установлено, что наибольшее значение верхнего предела полосы пропускания ДХ достигается путем минимизации емкостной нагрузки 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.

6. Данные компьютерного моделирования схемотехнического решения для приема, усиления и обработки данных сенсорных устройств, состоящего из интегрированных на одном кристалле с использованием библиотеки проектирования TSMC 0,18 мкм CMOS MS/RF 1,8/3,3V PDK ДХ, ДУ и 10-разрядного АЦП последовательного приближения и других

базовых компонентов, показали высокую эффективность разработанной электрической модели датчика, а также хорошее соответствие полученных результатов функциональным параметрам компонентов схемы обработки сигналов [6, 12–14].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Разработанные и реализованные в программном комплексе Silvaco технологические маршруты изготовления ДХ на основе кремния, по КНИ-технологии и на основе нитрида галлия достоверно воспроизводят конструкцию моделируемых сенсорных устройств, профили легирования и характеристики отдельных конструктивных элементов и могут использоваться на этапе отработки технологии их изготовления [1–19].

2. Предложенные принципы построения конструкции датчиков Холла, функционирующих при низких (до $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$) и высоких (до $400\text{ }^{\circ}\text{C}$) температурах, в качестве материала активной области которых применяются пленки антимонида индия (InSb) и гетероструктуры на основе нитрида галлия ($\text{Al}_{0,24}\text{Ga}_{0,76}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}/\text{Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{N}/\text{AlN}$) соответственно, а также подход к реализации сенсорной системы на основе четырех кремниевых датчиков Холла с интегрированным магнитным концентратором дискообразной формы из супермендюра позволяют разрабатывать устройства с высокими эксплуатационными характеристиками [1, 3, 9, 11, 17, 18].

3. Предложенная и реализованная на языке описания аналоговой аппаратуры Verilog-A обобщенная электрическая модель ДХ обеспечивает возможности адекватного моделирования эксплуатационных характеристик сенсорных устройств с учетом их конструктивных особенностей и используемых материалов и может использоваться для разработки схемотехнических решений на основе указанных датчиков в среде программных комплексов компьютерного проектирования ИМС [6, 10, 12–14].

4. Результаты исследования и оптимизации характеристик магниточувствительной сенсорной системы с интегрированным магнитным концентратором дискообразной формы свидетельствуют о перспективности ее применения для практического изготовления трехмерных датчиков слабых магнитных полей. Данный тип устройств существенно расширяет сферу применения датчиков Холла и может эффективно использоваться в качестве элементной базы аппаратуры магнитно-резонансной терапии, а также в приборах для геологических и геодезических исследований [2, 5, 19].

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в рецензируемых научных журналах

1. Конструктивно-технологические особенности сенсорных устройств на основе широкозонных полупроводников / В. С. Волчѣк, Динь Ха Дао, И. Ю. Ловшенко, В. Р. Стемпицкий // Доклады БГУИР. – 2015. – № 7 (93). – С. 99–105.

2. Интегральный трехмерный магнитометр на основе датчиков Холла, изготовленный по стандартной КМОП технологии / Динь Ха Дао, В. С. Волчѣк, М. С. Баранова, И. Ю. Ловшенко, Д. Ч. Гвоздовский, В. Р. Стемпицкий // Доклады БГУИР. – 2016. – № 7 (101). – С. 167–171.

3. Дао, Динь Ха. Исследование электрических и магнитных характеристик высокотемпературных датчиков Холла на основе гетероструктуры AlGaIn/GaN / Динь Ха Дао, В. Р. Стемпицкий // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2017. – № 1–2. – С. 28–32.

4. Дао, Динь Ха. Исследование характеристик датчика Холла с различной геометрией активной области / Динь Ха Дао, В. Р. Стемпицкий // Нано- и микросистемная техника. – 2018. – Т. 20, № 3. – С. 174–186.

5. Дао, Динь Ха. Приборно-технологическое моделирование магниточувствительного сенсора с интегрированным магнитным концентратором / Динь Ха Дао, В. Р. Стемпицкий // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2018. – № 3. – С. 15–21.

6. Дао, Динь Ха. Частотные характеристики интегральных датчиков Холла / Динь Ха Дао, В. Р. Стемпицкий // Доклады БГУИР. – 2018. – № 4 (114). – С. 64–70.

Статьи в сборниках материалов конференций

7. Дао, Динь Ха. Оптимизация конструктивно-технологических параметров полевого датчика Холла / Динь Ха Дао // Физика конденсированного состояния : сб. тр. XXIII междунар. науч.-практ. конф. аспирантов, магистрантов и студентов ФКС-23, Гродно, Беларусь, 16 апреля 2015 г. – Гродно, 2015. – С. 108–110.

8. Optimization of structural and technological parameters of the field effect Hall sensor / V. Volchek, I. Lovshenko, V. Stempitsky, Dinh Ha Dao, A. Belous, V. Saladukha // Proc. of the IEEE Int. Conf. on Advanced Technologies for Communications ATC 2015, Ho Chi Minh City, Vietnam, 14–16 October 2015. – Ho Chi Minh City, 2015. – P. 642–644.

9. Дао, Динь Ха. Датчик Холла на основе гетероструктуры AlGaIn/GaN, функционирующий до температуры 400 °С / Динь Ха Дао // Современные

проблемы радиоэлектроники : сб. науч. тр. Всероссийской науч.-техн. конф., Красноярск, Россия, 4–5 мая 2017 г. – Красноярск, 2017. – С. 504–507.

10. Dao, Dinh Ha. Verilog-A compact model of the silicon Hall element / Dinh Ha Dao, V. Stempitsky, Tuan Trung Tran // Proc. of the 7th IEEE Int. Conf. on Integrated Circuits, Design, and Verification ICDV 2017, Ha Noi, Vietnam, 5–6 October 2017. – Ha Noi, 2017. – P. 41–46.

11. Технологические и конструктивные решения высокочастотных, мощных и оптоэлектронных приборов на основе нитрида галлия / И. Ю. Ловшенко, В. С. Волчек, Динь Ха Дао, В. Т. Ханько, Джамаль Саад А. Омер, В. Р. Стемпицкий // Телекоммуникации: сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных : материалы междунар. науч.-техн. семинара, Минск, Беларусь, апрель – декабрь 2017 г. – Минск, 2017. – С. 70–76.

12. Dao, Dinh Ha. Advanced compact model and processing circuit for integrated sensor systems / Dinh Ha Dao // Nano-design, technology, computer simulations : Proceedings of 17th International workshop on new approaches to High-Tech, 26–27 October 2017. – Minsk : BSUIR, 2017. – P. 210–215.

13. Дао, Динь Ха. Обобщенная электрическая модель для схемотехнического моделирования магниточувствительных сенсоров / Динь Ха Дао, В. Р. Стемпицкий // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии : материалы междунар. крымской конф., Севастополь, 9–15 сентября 2018 г. – Севастополь, 2018. – С. 126–133.

14. Дао, Динь Ха. Схемотехническое решение для обработки данных сенсорных устройств в интегральном исполнении / Динь Ха Дао // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии : материалы междунар. крымской конф., Севастополь, 9–15 сентября 2018 г. – Севастополь, 2018. – С. 134–140.

Тезисы докладов на научных конференциях

15. Дао, Динь Ха. Параметры полевого датчика Холла при различных режимах включения / Динь Ха Дао, В. Р. Стемпицкий // Технические средства защиты информации : тез. докл. XIII Белорусско-российской науч.-техн. конф., Минск, Беларусь, 4–5 июня 2015 г. – Минск, 2015. – С. 71.

16. Дао, Динь Ха. Особенности технологического и приборного моделирования полевого датчика Холла / Динь Ха Дао // НИРС МСФ-2015 : сб. науч. тр. [Электронный ресурс] / ред. А. М. Авсиевич, С. И. Адаменкова, Ю. В. Василевич ; кол. авт. Белорусский национальный технический университет. – Минск : БНТУ, 2015. – Режим доступа: <http://rep.bntu.by/handle/data/19030>. – Дата доступа: 15. 05.2018.

17. Дао, Динь Ха. Оптимизация параметров сенсорных устройств на основе широкозонных полупроводников / Динь Ха Дао // Технические средства защиты информации : тез. докл. XIV Белорусско-российской науч.-техн. конф., Минск, 25–26 мая 2016 г. – Минск, 2016. – С. 55.

18. Дао, Динь Ха. Влияние эффекта захвата на переходные характеристики AlGaIn/GaN сенсорных устройств / Динь Ха Дао // Интеллектуальные и сенсорные системы – 2016 : сб. науч. тр. по материалам Республиканской студенческой научно-технической конференции [Электронный ресурс] / ред. А. М. Авсиевич ; кол. авт. Белорусский национальный технический университет. – Минск : БНТУ, 2016. – Режим доступа: <http://rep.bntu.by/handle/data/24558>. – Дата доступа: 15.05.2018.

19. Дао, Динь Ха. Датчик Холла с интегральным магнитным концентратором / Динь Ха Дао // Технические средства защиты информации : тез. докл. XV Белорусско-российской науч.-техн. конф., Минск, Беларусь, 6 июня 2017 г. – Минск, 2017. – С. 87.

РЭЗІЮМЭ

Дао Дзінь Ха

Прыборна-тэхналагічнае мадэліраванне інтэгральных датчыкаў Хола на аснове крэмнія, анціманіда індые і нітрыду галія

Ключавыя словы: прыборна-тэхналагічнае і схематэхнічнае мадэліраванне, датчык Хола, крэмній, анціманід індые, нітрыд галія, інтэграваны магнітны канцэнтратар.

Мэта працы: распрацоўка прынцыпаў пабудовы і электрычных мадэляў інтэгральных датчыкаў Хола і магнітаадчувальных сэнсарных прылад, вырабленых з ужываннем стандартнай крамянёвай тэхналогіі, на аснове анціманіда індые і нітрыду галія, а таксама метадаў камп'ютэрнага мадэлявання канструктыўных і схематэхнічных рашэнняў, прызначаных для выкарыстання ў сучасных інфармацыйна-аналітычных сістэмах.

Метад даследавання: прыборна-тэхналагічнае, схематэхнічнае і тапалагічнае мадэліраванне, заснаванае на выкарыстанні мадэляў тэхналагічных працэсаў мікраэлектронікі і пераноса носбітаў зарада.

Атрыманая вынікі і іх навізна:

– канструктыўныя рашэнні датчыкаў Хола з высокай абсалютнай адчувальнасцю, якія функцыянуюць пры нізкіх (да $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$) і высокіх (да $400\text{ }^{\circ}\text{C}$), тэмпературах дзе ў якасці матэрыялу актыўнай вобласці прымяняюцца плёнкі анціманіда індые (InSb) і гетэраструктур на аснове нітрыду галія ($\text{Al}_{0,24}\text{Ga}_{0,76}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}/\text{Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{N}/\text{AlN}$) адпаведна;

– прапанаваны і даследаваны ў рамках прыборна-тэхналагічнага мадэліравання падыход да рэалізацыі сэнсарнай сістэмы на аснове чатырох крамянёвых датчыкаў Хола з інтэграваным магнітным канцэнтратарам дыскоабразнай формы з супермендзюра, дазваляе праектаваць прылады з высокім каэфіцыентам узмацнення магнітнага патоку, прызначаныя для дэтэктавання слабых магнітных палёў;

– абагульненая электрычная мадэль, прызначаная для апісання статычных і дынамічных характарыстык крамянёвых і нітрыд-галіевых датчыкаў Хола, а таксама сэнсарных сістэм з інтэграваным магнітным канцэнтратарам, якая ўлічвае тып матэрыялу і асаблівасці канструкцыі прылады.

Рэкамендацыі па выкарыстанні і вобласць прымянення: атрыманая вынікі рэкамендуецца выкарыстоўваць пры распрацоўцы канструктыўных і схематэхнічных рашэнняў на аснове датчыкаў Хола з высокімі эксплуатацыйнымі характарыстыкамі, прызначаных для інтэграцыі і прымянення ў складзе сучасных інфармацыйна-аналітычных сістэм.

РЕЗЮМЕ

Дао Динь Ха

Приборно-технологическое моделирование интегральных датчиков Холла на основе кремния, антимонида индия и нитрида галлия

Ключевые слова: приборно-технологическое и схемотехническое моделирование, датчик Холла, кремний, антимонид индия, нитрид галлия, интегрированный магнитный концентратор.

Цель работы: разработка принципов построения и электрических моделей интегральных датчиков Холла и магниточувствительных сенсорных устройств, изготовленных с применением стандартной кремниевой технологии, на основе антимонида индия и нитрида галлия, а также методов компьютерного моделирования конструктивных и схемотехнических решений, предназначенных для использования в современных информационно-аналитических системах.

Метод исследования: приборно-технологическое, схемотехническое и топологическое моделирование, основанное на моделях технологических процессов микроэлектроники и переноса носителей заряда.

Полученные результаты и их новизна:

– конструктивные решения датчиков Холла с высокой абсолютной чувствительностью, функционирующие при низких (до $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$) и высоких (до $400\text{ }^{\circ}\text{C}$) температурах, где в качестве материала активной области применяются пленки антимонида индия (InSb) и гетероструктуры на основе нитрида галлия ($\text{Al}_{0,24}\text{Ga}_{0,76}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}/\text{Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{N}/\text{AlN}$) соответственно;

– предложенный и исследованный в рамках приборно-технологического моделирования подход к реализации сенсорной системы на основе четырех кремниевых датчиков Холла с интегрированным магнитным концентратором дискообразной формы из супермендюра позволяет проектировать устройства с высоким коэффициентом усиления магнитного потока, предназначенные для детектирования слабых магнитных полей;

– обобщенная электрическая модель, предназначенная для описания статических и динамических характеристик кремниевых и нитрид-галлиевых датчиков Холла, а также сенсорных систем с интегрированным магнитным концентратором, учитывающая тип материала и особенности конструкции устройства.

Рекомендации по использованию и область применения: разработка конструктивных и схемотехнических решений на основе датчиков Холла, предназначенных для интеграции в состав современных информационно-аналитических систем.

SUMMARY

Dao Dinh Ha

Device-technological simulation of integrated Hall sensors based on silicon, indium antimonide and gallium nitride

Key words: device-technological and circuit simulation, Hall sensor, silicon, indium antimonide, gallium nitride, integrated magnetic concentrator.

The goal of the work: development of the principles of construction and electrical models of integrated Hall sensors and magnetosensitive sensor devices manufactured using standard silicon technology based on indium antimonide and gallium nitride, as well as investigation of the computer simulation methods for constructive and circuit solutions design for use in modern information and analytical systems.

Research method: device-technological, schematic and topology simulation, based on models of microelectronics technological processes and charge carrier transfer.

The results obtained and their novelty:

– design solutions of Hall sensors with high absolute sensitivity, operating at low temperatures (up to $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$) and high (up to $400\text{ }^{\circ}\text{C}$) temperatures, where films of indium antimonide (InSb) and heterostructures based on gallium nitride ($\text{Al}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}/\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}/\text{AlN}$), are used as active area respectively;

– the approach to the implementation of a sensor system based on four silicon Hall sensors with an integrated magnetic disc-shaped concentrator from a supermendure allows to design devices with a high magnetic flux amplification factor for detecting weak magnetic fields;

– a generalized electric model designed to describe the static and dynamic characteristics of silicon and nitride-gallium Hall sensors, as well as sensor systems with an integrated magnetic concentrator, taking into account the type of material and the design features of the device.

Recommendations for use and scope: development of structural and circuit solutions based on Hall sensors intended for integration into modern information and analytical systems.

Научное издание

Дао Динь Ха

**ПРИБОРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ИНТЕГРАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ ХОЛЛА НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ,
АНТИМОНИДА ИНДИЯ И НИТРИДА ГАЛЛИЯ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные
компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах

Подписано в печать 22.08.2018.	Формат 60×84 ¹ / ₁₆ .	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Отпечатано на ризографе.	Усл. печ. л. 1,63.
Уч.-изд. л. 1,4.	Тираж 60 экз.	Заказ 90.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,

№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.

ЛИ №02330/264 от 14.04.2014

220013, Минск, П. Бровки, 6