

На правах рукописи



Чесницкий Антон Васильевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТООПТИЧЕСКИХ И ТРЕХОСЕВЫХ
ХОЛЛОВСКИХ ДАТЧИКОВ**

01.04.10 – Физика полупроводников

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель: Принц Виктор Яковлевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией физики и технологии трёхмерных наноструктур Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук»

Официальные оппоненты:

Айзенштат Геннадий Исаакович, доктор технических наук, начальник лаборатории акционерного общества Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов «НИИПП»

Прудаев Илья Анатольевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук (ИАиЭ СО РАН), г.Новосибирск

Защита состоится 7 февраля 2019 г. в 11.00 в конференц-зале на заседании диссертационного совета Д.212.173.03 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, г. Новосибирск, проспект Карла Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте www.nstu.ru.

Автореферат разослан __ декабря 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д.212.173.03
к.т.н., доцент



Остертак Д.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертационная работа относится к области магнитных измерений и посвящена разработке новых типов микро- нанодатчиков датчиков магнитного поля с электрическими и оптическими способами регистрации.

Актуальность работы

В настоящее время датчики магнитного поля широко используются в различных областях науки и техники [1]. Например, датчики магнитного поля позволяют бесконтактно и очень точно измерять расстояние до объектов, на которых размещен миниатюрный постоянный магнит. Данный принцип регистрации линейных и угловых перемещений и положений объектов в пространстве применяется в авто- и авиатехнике, автоматизированных станках и сборочных линиях в промышленности [2]. Кроме того, измерение магнитного поля Земли необходимо в навигации, при поиске полезных ископаемых, в системах безопасности и обнаружения оружия.

При разработке датчиков магнитного поля все чаще приходится решать задачи повышения их чувствительности, надежности, уменьшения массы, потребляемой мощности и снижения себестоимости. Вызовом также является разработка и формирование трёхосевых датчиков, позволяющих измерять вектор магнитного поля. Бурное развитие технологий «интернета вещей», портативной и носимой энергоэффективной электроники требует миниатюризации датчиков, а развитие робототехники требует различных сенсорных систем восприятия окружения и определения положения в пространстве. Традиционные датчики на эффекте Холла позволяют измерять только одну компоненту вектора магнитного поля, перпендикулярную плоскости датчика. Зачастую требуется одновременно и локально измерять все три компоненты вектора магнитного поля и величину его градиента. Изготовление трехосевых датчиков обычно представляет собой последовательную сборку из 3х одноосевых, что не позволяет существенно уменьшать габаритные размеры датчиков и осуществить локальные измерения. Как показал анализ, в настоящее время отсутствует технология создания массивов миниатюрных трехосевых холловских датчиков с микронной или субмикронной областью измерения.

Для многих практических применений важным является дистанционное бесконтактное измерение магнитного поля, и, в принципе, такие измерения можно осуществлять с помощью оптических методов регистрации. К таким датчикам относятся магнитооптические, в которых происходит изменение характеристик отраженного света во внешнем магнитном поле. Однако слабая модуляция света ограничивает возможность практического применения традиционных магнитооптических структур [3]. Требуется поиск новых подходов, позволяющих повысить чувствительность к магнитному полю.

Из вышеизложенного вытекает актуальность разработки миниатюрных бесконтактных магнитооптических и трехосевых датчиков магнитного поля для робототехники, технологий «интернета вещей» и промышленности.

Целью диссертационной работы является разработка и исследование электрических и оптических микродатчиков магнитного поля: а) трёхосевых холловских миниатюрных датчиков на основе полупроводниковых микротрубок, содержащих двумерный электронный газ; б) магнитооптических нанодатчиков на основе металл-диэлектрических наноструктур с плазмон-плазмонным взаимодействием.

Для достижения указанной цели требовалось решить следующие **задачи**:

1. Сформировать холловские датчики, расположенные на микротрубках InGaAs/AlGaAs/GaAs с двумерным электронным газом.

2. Определить оптимальные условия формирования полупроводниковых микротрубок с холловскими элементами для точного ортогонального расположения осей чувствительности датчика.

3. Провести экспериментальное исследование магнитопольных, угловых и шумовых характеристик изготовленных холловских датчиков и проанализировать возможность практического применения их в качестве трехосевых датчиков магнитного поля.

4. Изучить возможность увеличения устойчивости тонкопленочных трубчатых холловских датчиков к внешним воздействиям среды.

5. Разработать конструкцию и выполнить численное моделирование, провести оптимизацию геометрических параметров плазмонноусиленного магнитооптического датчика на экваториальном эффекте Керра с целью повышения величины магнитооптического отклика.

Научная новизна

1. Созданный трубчатый холловский датчик на основе наногетероструктуры, содержащей двумерный электронный газ в квантовой яме GaAs, обладает высокой чувствительностью и открывает возможности локального (~ 10 мкм) измерения слабых магнитных полей и регистрации трех компонент вектора магнитного поля. Конструкция датчика перспективна для масштабирования и перехода к микронным и субмикронным размерам.

2. Изучены шумовые характеристики свернутых холловских мостиков на основе полупроводниковой гетероструктуры InGaAs/AlGaAs/GaAs, выращенной методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Измерены частотные зависимости спектральной плотности

шума $S_N(f)$ и определен порог чувствительности $B_N(f)$ плоского и аналогичного свернутого в трубку-свиток холловского датчика.

3. Реализован эффективный способ защиты тонкопленочных (нанометровой толщины) изогнутых холловских мостиков от внешних воздействий среды, путем запечатывания в матрицу полидиметилсилоксана (ПДМС).

4. Разработан дизайн и с помощью численного моделирования исследована и оптимизирована конструкция плазмонноусиленного магнитооптического датчика в геометрии экваториального эффекта Керра.

Практическая значимость диссертационной работы

1. Разработаны трубчатые трёхосевые холловские микродатчики магнитного поля на основе напряженной полупроводниковой модулировано-легированной гетероструктуры GaAs/AlGaAs/InGaAs, содержащей двумерный электронный газ в качестве чувствительного элемента датчика.

2. Продемонстрировано одновременное измерение всех 3-х компонент вектора магнитного поля одним миниатюрным трехосевым холловским датчиком, что открывает возможность практического применения трехосевых датчиков, например, в составе электронных навигационных приборов или в составе микрофлюидных систем.

3. Разработанная конструкция бесконтактных трёхосевых холловских датчиков на основе полупроводниковых микротрубок является перспективной для применения в качестве бесконтактного датчика для локального определения линейных и угловых перемещений в авто-, авиа-, робототехнике, а также для определения распределения магнитного поля в пространстве и величины его градиента.

4. Микротрубки с холловскими датчиками, запечатанные в полимерную матрицу, являются устойчивыми к внешним воздействиям среды и могут применяться в условиях с повышенными требованиями надежности.

5. Разработана конструкция магнитооптических датчиков на экваториальном эффекте Керра, перспективная для практического применения в качестве датчиков магнитного поля, а также чувствительных элементов биологических сенсоров.

6. С помощью численного моделирования проведена оптимизация геометрических параметров многослойной металл-диэлектрической трехмерной наноструктуры для улучшения магнитооптического отклика, коэффициента отражения и чувствительности магнитооптического датчика.

Положения выносимые на защиту

1. Разработанные миниатюрные трубчатые холловские датчики с оригинальной топологией позволяют одновременно и локально измерять три взаимно ортогональные компоненты вектора магнитного поля. Чувствительность трехосевых холловских датчиков на основе микротрубок InGaAs/AlGaAs/GaAs с радиусом $R_c=10$ мкм, содержащих двумерный электронный газ, достигает $S_I=470$ Ом/Тл.

2. Запечатывание полупроводниковых нанооболочек, содержащих чувствительные холловские элементы, в матрицу полидиметилсилоксана (ПДМС) позволяет увеличить устойчивость к внешним воздействиям среды и не приводит к ухудшению характеристик трехосевых датчиков магнитного поля.

3. Оптимизированный с помощью численного моделирования магнитооптический датчик на основе периодического массива металлических наночастиц, внедренных в пленку ферромагнитного диэлектрика на поверхности металла, обладает высоким магнитооптическим откликом и является перспективным для практического применения в качестве дистанционных бесконтактных датчиков магнитного поля. Усиление магнитооптического отклика на два порядка по сравнению с традиционными структурами достигается за счет конструкции датчика, поддерживающей бегущий и локализованный плазмонный резонансы в геометрии магнитооптического экваториального эффекта Керра.

Методология и методы исследования

Для решения поставленных в работе задач использовались методы научного обобщения и анализа теоретических и экспериментальных данных, численного моделирования, лабораторных экспериментов с применением метрологически аттестованного измерительного оборудования.

Личный вклад автора заключается в том, что все представленные в диссертации результаты были получены лично автором или при его непосредственном участии. Обсуждение полученных результатов и подготовка их к публикации проводилась совместно с соавторами.

Степень достоверности и апробация диссертационной работы

Представленные в работе экспериментальные результаты находятся в соответствии с теоретическим описанием физических явлений. Измерение характеристик, изготовленных лабораторных образцов датчиков магнитного поля проводились на метрологически аттестованном оборудовании. Достоверность результатов математического моделирования электромагнитных процессов в предложенных структурах подтверждается адекватностью выбранных физических моделей и методов численных расчетов. Полученные результаты

численного моделирования находятся в согласии с теорией усиления магнитооптических эффектов в резонансных структурах и данными описанными в литературе.

Результаты работы были представлены на следующих международных и всероссийских научных конференциях:

- «19-th International Symposium Nanostructures: Physics and technology» (Ekaterinburg, Russia, 20-25 June, 2011);
- «X Российская конференция по физике полупроводников», (Нижний Новгород, 19-23 сентября, 2011 г.);
- «XIII Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и полупроводниковой опто – и наноэлектронике» (г. Санкт-Петербург, Россия, 21-25 ноября, 2011г.);
- « XI Российская конференция по физике полупроводников» (г. Санкт-Петербург, Россия, 16 - 20 сентября, 2013 г.);
- «XX Уральская международная зимняя школа по физике полупроводников» (Екатеринбург-Новоуральск, Россия, 17 – 22 февраля, 2014 г.);
- «22-nd International Symposium Nanostructures: Physics and technology» (Saint Petersburg, Russia, 23-27 June, 2014);
- «24-th International Symposium Nanostructures: Physics and technology» (Saint Petersburg, Russia, 26 June -1 July, 2016).

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 11 научных работ: 3 статьи в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК; 1 патент РФ на изобретение; 7 тезисов в материалах международных и всероссийских научных конференций.

Структура, объем и содержание работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, двух приложений и списка литературы из 135 наименований. Общий объем диссертации составляет 155 страниц, включая 3 таблицы и 80 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновывается актуальность научного исследования и темы диссертационной работы. Формулируются цель и задачи работы, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Приводится список публикаций и научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проводится обзор литературы и уделяется особое внимание существующим способам изготовления датчиков магнитного поля. Кратко описаны

различные варианты конструкции трехмерных и плазмонноусиленных магнитооптических датчиков и рассмотрены их преимущества и недостатки. Рассмотрены передовые технологии создания датчиков магнитного поля, в том числе датчиков с изменяемой формой для нужд гибкой электроники и технологий «интернета вещей». Создание трехмерных миниатюрных сенсоров открывает пути к их применению в качестве энергоэффективной портативной и носимой электроники. Появление множества новых конструкций различных датчиков физических величин в последние годы главным образом обусловлено развитием нанотехнологий. Тенденциями являются уменьшение размеров датчиков и увеличение их чувствительности. Использование современных подходов микро- и наноструктурирования позволяет значительно улучшать характеристики датчиков, уменьшать их размеры и расширять области возможных применений.

На основании анализа литературных данных показано, что повышение уровня интеграции электронных приборов требует, кроме повышения чувствительности и уменьшения размеров датчиков, перехода от одноосевых датчиков (измеряющих проекцию какой-либо величины на одну координатную ось) к двух- и трёхосевым. Для измерения всех трех компонент вектора магнитного поля в литературе предложено использовать так называемые вертикальные холловские элементы или ферромагнитные концентраторы на поверхности планарных холловских датчиков, что в обоих случаях приводит к значительному ухудшению характеристик датчиков и не позволяет достичь микронных и наноразмеров. Таким образом, в настоящее время отсутствует технология создания массивов трехосевых холловских микродатчиков.

Последние несколько лет наблюдается повышенный интерес к наноструктурам, которые обладают плазмонными и магнитооптическими свойствами. Рассмотрены некоторые варианты плазмонноусиленных магнитооптических структур, перспективных для ряда практических применений в качестве бесконтактных сенсоров. Современное положение дел в области магнитооптики таково, что практическое применение устройств ограничено низкими величинами магнитооптического отклика. Основной проблемой большинства работ является то, что в магнитооптических структурах присутствуют ферромагнитные металлы и это приводит к значительным оптическим потерям. Показано, что наиболее перспективным решением для дизайна плазмонноусиленных магнитооптических датчиков является использование ферромагнитных диэлектриков, обладающих несколько меньшей величиной магнитооптического отклика, но с другой стороны обладающих значительно меньшими потерями. Зачастую в литературе используется понятие относительного значения магнитооптического отклика $\delta_{отн}$, которое достигается за счет малого коэффициента отражения и неприменимо для большинства задач магнитооптики.

Во **второй главе** подробно описываются особенности конструкции и основные этапы формирования трехосевых холловских датчиков на основе полупроводниковых микротрубок. Из анализа современных методов создания датчиков магнитного поля следует, что в настоящее время имеется потребность в разработке технологии трёхосевых холловских датчиков, которая способна обеспечить одновременное создание сразу трех датчиков за один технологический процесс на одном чипе.

Описана оригинальная методика изготовления трехосевого холловского микродатчика на основе полупроводниковых микротрубок с двумерным электронным газом. Датчик позволяет локально и одновременно измерять три компоненты вектора магнитного поля [4, 5]. Традиционный планарный датчик на эффекте Холла позволяет измерять только одну компоненту вектора магнитного поля, перпендикулярную плоскости датчика. Планарный датчик в форме холловского мостика имеет две пары холловских контактов. Измеряемая холловская ЭДС пропорциональна локальному значению компоненты вектора магнитного поля (Рисунке 1а). Если изогнуть такой датчик на цилиндрической поверхности, как показано на Рисунке 1б, то можно измерять одновременно две взаимно ортогональные компоненты вектора магнитного поля V_z и V_x . Добавив вторую микротрубку, ось которой перпендикулярна оси первой, можно измерить и третью компоненту (Рисунок 1в). На Рисунке 1в стрелки показывают направления ортогональных компонент V_x , V_y и V_z вектора внешнего магнитного поля.

При создании трехосевого датчика необходимо было решить ряд технологических проблем. Среди которых: проблема селективного отсоединения напряженных полупроводниковых нанопленок двумерным электронным газом от массивной подложки GaAs. Проблема направленного сворачивания отсоединяемой нанопленки в микротрубку, [6]. Необходимо было разработать профиль и провести численный расчёт параметров полупроводниковой гетероструктуры (Рисунок 2а). Гетероструктура содержит ряд важных функциональных слоев. Это квантовая яма GaAs шириной 13 нм, которая находится в обкладках тройного твердого раствора AlGaAs, δ -легированного кремнием. Известно, что относительная чувствительность плоских холловских датчиков на основе гетероструктур с квантовой ямой, содержащей двумерный электронный газ, на 1-2 порядка превышает чувствительность датчиков на основе объемных полупроводников. Гетероструктура содержит также сжатый слой InGaAs, который при селективном удалении жертвенного слоя AlAs инициирует сворачивание освобожденной от связи с подложкой пленки в трубку свиток.

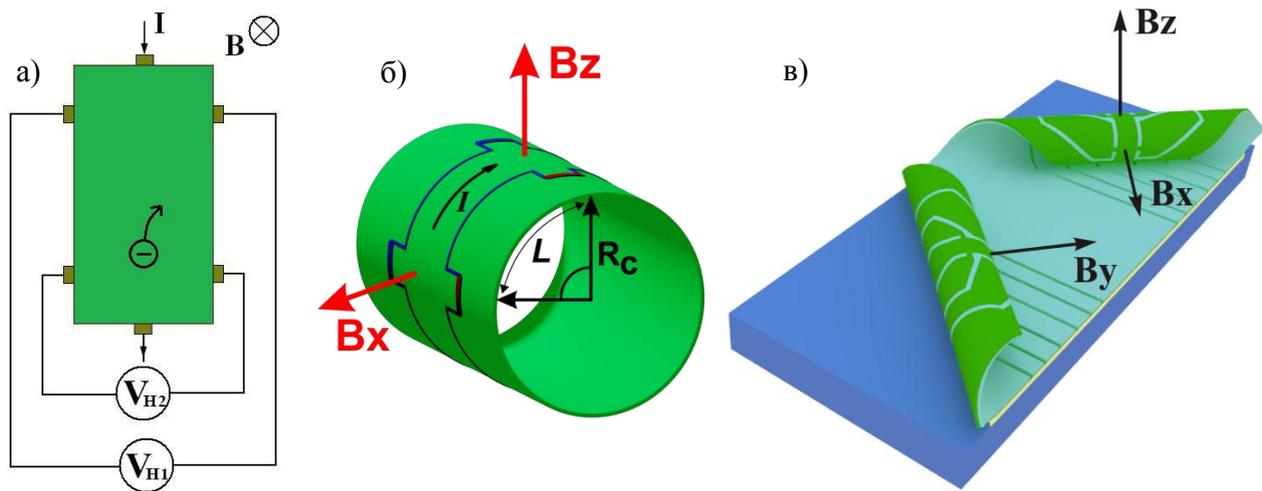


Рисунок 1 – Холловский датчик: а) планарный холловский мостик с двумя парами потенциальных контактов; б) геометрия, используемая для позиционирования холловских пар внутри микротрубки; в) холловские мостики, свернутые в трубки.

Необходимо было провести расчет и оптимизировать радиус кривизны микротрубок для выбранной нами гетероструктуры и он составил $R_c = 10 \pm 1$ мкм. Необходимо было соблюдать точное геометрическое позиционирование холловских пар контактов внутри стенок микротрубки (Рисунок 1б). Все это обеспечивало ортогональное расположение двух осей чувствительности датчика магнитного поля на основе одной микротрубки. Конструкция датчика и его размеры задавались так, чтобы все три холловских пары контактов лежали в ортогональных плоскостях после сворачивания гетеропленки. Было рассчитано необходимое расстояние между холловскими парами контактов, и оно составило $L = 16 \pm 1$ мкм.

В результате моделирования с помощью программы «1DPoisson», выполняющей численное решение уравнений Шрёдингера и Пуассона, были получены зонные диаграммы и концентрационные профили используемой гетероструктуры GaAs/AlGaAs/InGaAs. На основании расчёта распределения носителей заряда были установлены оптимальные толщины слоев, обеспечивающих расположение большей части носителей заряда в прямоугольной квантовой яме GaAs и отсутствие обеднения чувствительной пленки после освобождения её от подложки (Рисунок 2б).

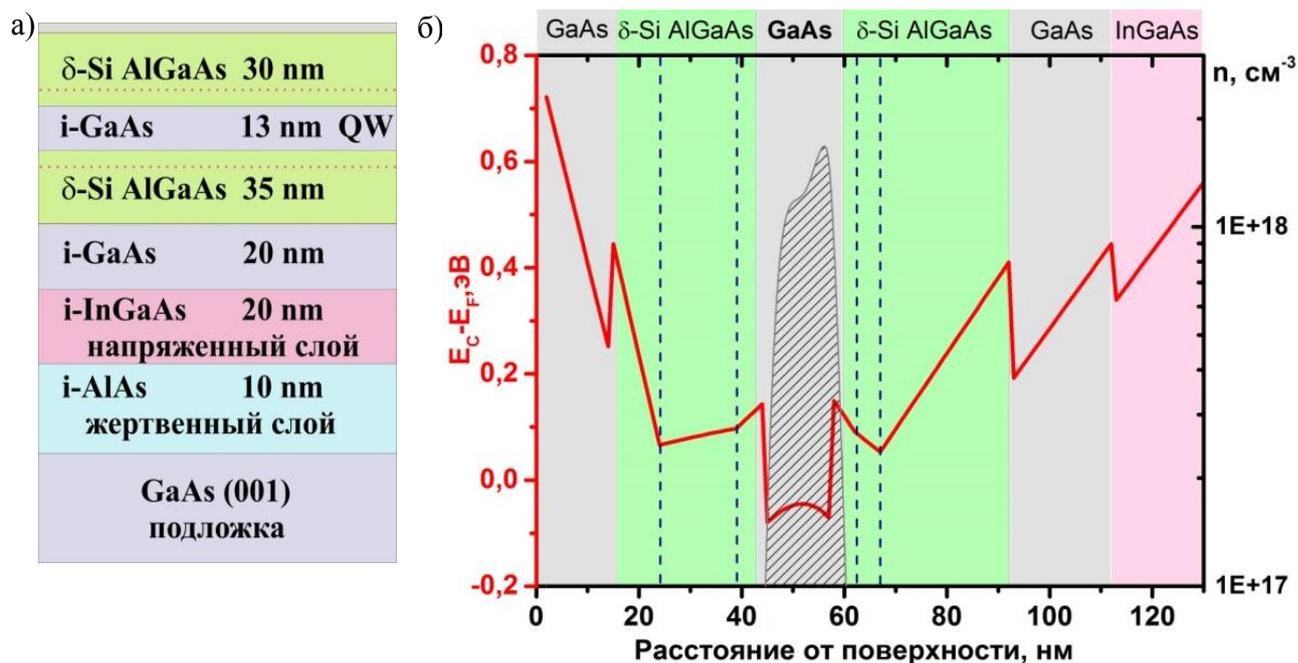


Рисунок 2 – Исходная многослойная гетероструктура: а) схематическое изображение профиля используемой напряженной эпитаксиальной гетероструктуры; б) диаграмма зоны проводимости (красная линия) и соответствующее распределение концентрации электронов (заштрихованная область) в освобожденной от подложки нанопленке

Разработанная конструкция трехосевых датчиков магнитного поля на основе полупроводниковых микротрубок позволяет одновременно и локально (~ 10 мкм) измерять все три компоненты вектора магнитного поля. Более того, возможно дальнейшее уменьшение размеров датчика за счет масштабирования и оптимизации параметров гетероструктуры с двумерным электронным газом или за счет использования других перспективных материалов, например, графена графена с высокоподвижным электронным газом, расположенным на полупроводниковой нанотрубке.

Предложенная в работе оригинальная топология микродатчика является совместимой с планарной технологией, используемой при производстве интегральных схем. Следовательно, возможно размещение на одном чипе с активным элементом микродатчика схем обработки сигнала (усиление, фильтрация шумов и т.п.), а также изготовление массивов одинаковых трехосевых датчиков для измерения пространственного распределения магнитного поля и его градиента. Широкое применение могут найти упрощённые варианты предложенной конструкции датчика, а именно, одна микро- или нанотрубка с двумя холловскими переходами – в качестве двухосевого локального датчика магнитного поля.

В **третьей** главе приведены результаты экспериментального исследования характеристик изготовленных лабораторных образцов трехосевых холловских датчиков. Подробно описана методика изготовления и изготовлены лабораторные образцы трехосевых

холловских микродатчиков с размерами активной области $500 \times 20 \times 20$ мкм (объем $< 10^{-3}$ мм³) на основе модулировано-легированной гетероструктуры InGaAs/AlGaAs/GaAs, выращенной методом МЛЭ и содержащей 6 слоев (Рисунок 2а). Слой AlAs является жертвенным, его удаление приводит к отсоединению пленки из 5 слоев. Межатомные силы в InGaAs слое сжаты по сравнению со слоем GaAs при его отсоединении от подложки приводят к сворачиванию всей пленки в микротрубку-свиток. Слои AlGaAs/GaAs/AlGaAs, образующие квантовую яму с легированными обкладками, являются главными как для формирования датчика Холла, так и для формирования подводящих контактных дорожек.

Для управляемого формирования трубок в работе использовался метод направленного сворачивания мезоструктуры, подготовленной в процессе двухуровневой фотолитографии (Рисунок 3а). На первом этапе с помощью оптической литографии задавался стартовый край с которого будет начинаться сворачивание трубки. На втором этапе проводилось травление неглубоких изолирующих канавок (светло-серые полосы на Рисунке 3б), которые формировали проводящие области в форме холловского мостика и контактных дорожек.

На третьем этапе проводилось освобождение полупроводниковой нанопленки от подложки. Для этого выполнялось высокоселективное травление жертвенного слоя в жидкостном травителе на основе раствора HF (скорость травления AlAs в 10^8 раз больше скорости травления GaAs). Рассмотрены варианты остановки процесса травления.

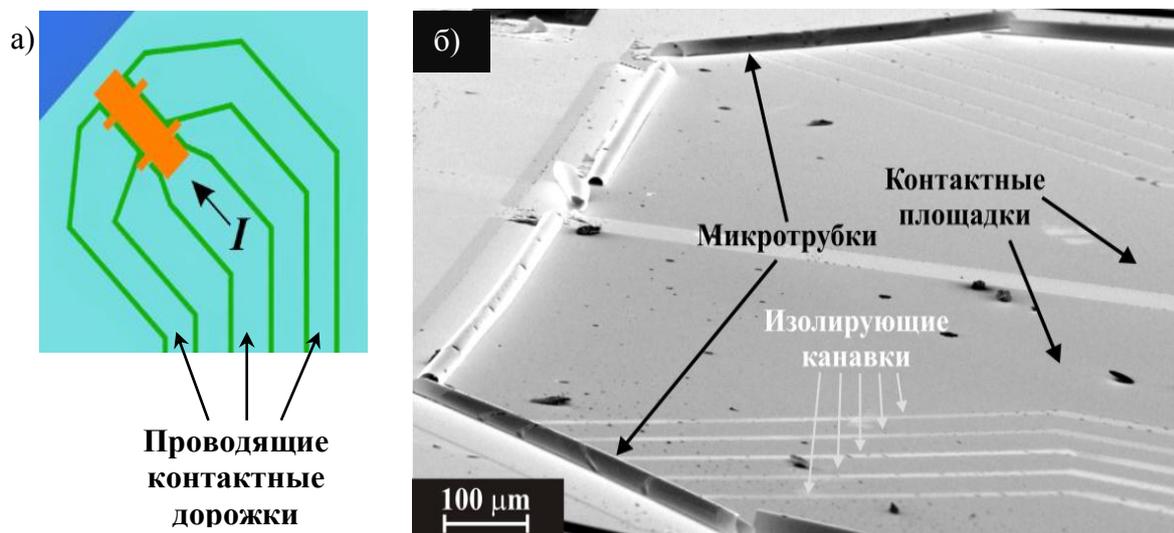


Рисунок 3 – Формирование трехосевых холловских датчиков: а) плоская литографически подготовленная мезоструктура; б) СЭМ изображение пары микротрубок, оси которых расположены перпендикулярно друг другу

В главе описаны экспериментальные установки и методики, используемые для исследования основных характеристик трехосевых холловских микродатчиков. На Рисунке 4а приведены результаты измерения зависимостей холловской ЭДС от внешнего магнитного поля при различных величинах тока через образец. Показано, что магнитопольевые характеристики имеют линейный вид в широком диапазоне магнитных полей и относительная чувствительность изогнутых холловских микродатчиков к магнитному полю достигает $S_1 = 470 \pm 14 \frac{\text{Om}}{\text{Tл}}$ при $T=300 \text{ K}$ и это соответствует лучшим мировым аналогам одноосевых датчиков магнитного поля. Значения концентрации двумерных электронов n_{2D} , полученные из наклона магнитопольевых зависимостей, и значения подвижности μ вдоль направлений типа $\langle 100 \rangle$ составили $n_{2D} = 1.33 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ и $\mu = 4700 \frac{\text{см}^2}{\text{В}\cdot\text{с}}$. По результатам экспериментов была определена оптимальная ширина токового канала холловского мостика, и она лежит в пределах $W=16\div 32 \text{ мкм}$.

На Рисунке 4б приведены результаты измерения угловых зависимостей холловской ЭДС изготовленных образцов. Продемонстрировано одновременное и локальное измерение всех 3-х компонент вектора магнитного поля одним неподвижным микродатчиком. Было показано, что зависимости $V_{H1}(\varphi)$ и $V_{H2}(\varphi)$ представляют собой синусоиды равной амплитуды, сдвинутые по фазе на $90^\circ \pm 10^\circ$, что подтверждает ортогональную ориентацию соответствующих холловских пар контактов внутри микротрубки.

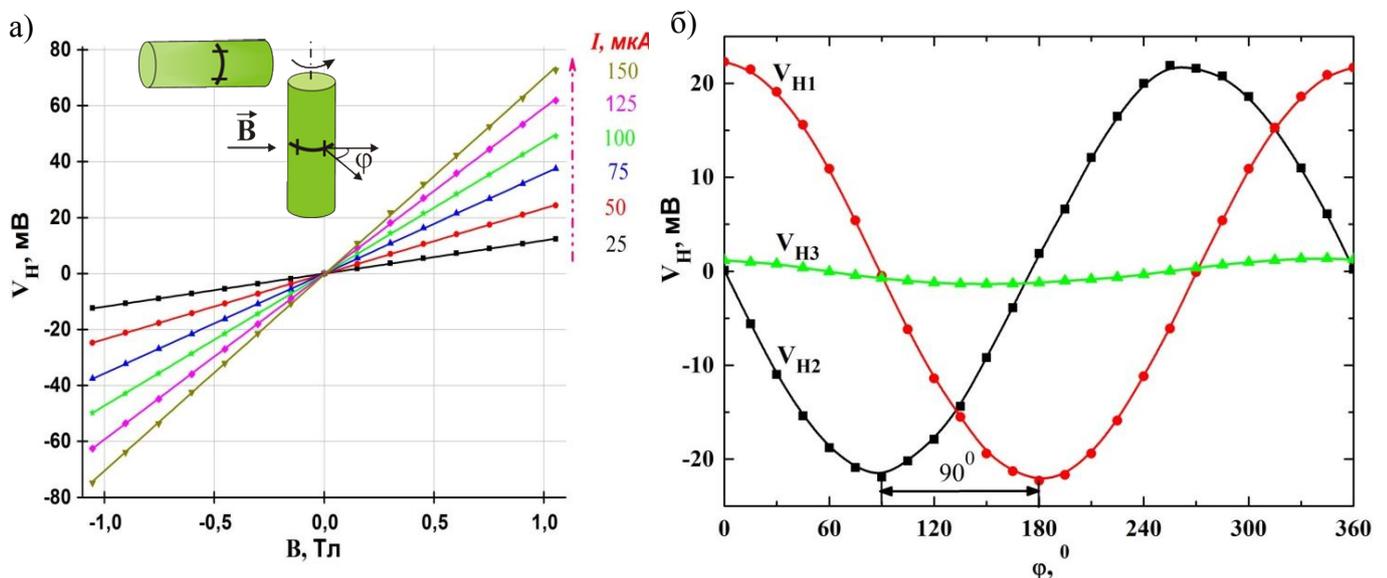


Рисунок 4 – Зависимости холловской ЭДС: а) от магнитного поля изогнутого холловского микродатчика при различных токах через образец; б) от угла поворота трёхосевого холловского микродатчика при $B=1 \text{ Тл}$. На вставке показана геометрия эксперимента

В то же время холловское напряжение для третьего чувствительного элемента V_{H3} практически не зависит от угла поворота φ , то есть, вектор внешнего магнитного поля с хорошей точностью лежит в плоскости соответствующей холловской пары контактов. По оценке отклонение для третьей оси датчика составляет величину менее 4° .

Экспериментально исследованы шумовые характеристики изогнутых холловских мостиков на основе полупроводниковой гетероструктуры InGaAs/AlGaAs/GaAs. Проведена подгонка спектра для $1/f$ – шума и рассчитаны численные значения шумового параметра Хуга изогнутого холловского датчика ($\alpha_H = 5.5 \cdot 10^{-4}$) и они находятся в согласии с типовыми значениями α_H , найденными в литературе для гетероструктур на основе полупроводников A^{III}B^V (Рисунок 5а). Из измерений спектральной плотности шума получено значение порога чувствительности B_N , которое определяется величиной шума эквивалентного магнитному полю, и на высоких частотах порядка $f \approx 100$ кГц оно составило 400 нТл/Гц^{1/2} при токе через образец равном $I=200$ мкА (Рисунок 5б). Обсуждается возможность применения изогнутых холловских датчиков InGaAs/AlGaAs/GaAs для измерения слабых магнитных полей (<1 мкТл), что является актуальным в навигации, в холловской зондовой микроскопии, при поиске полезных ископаемых, в системах безопасности и обнаружения оружия.

Известно, что свободные тонкие наноплёнки весьма чувствительны к внешним механическим воздействиям, в том числе, и к капиллярным силам, возникающим из-за капель жидкости, конденсирующихся на образце в процессе его эксплуатации.

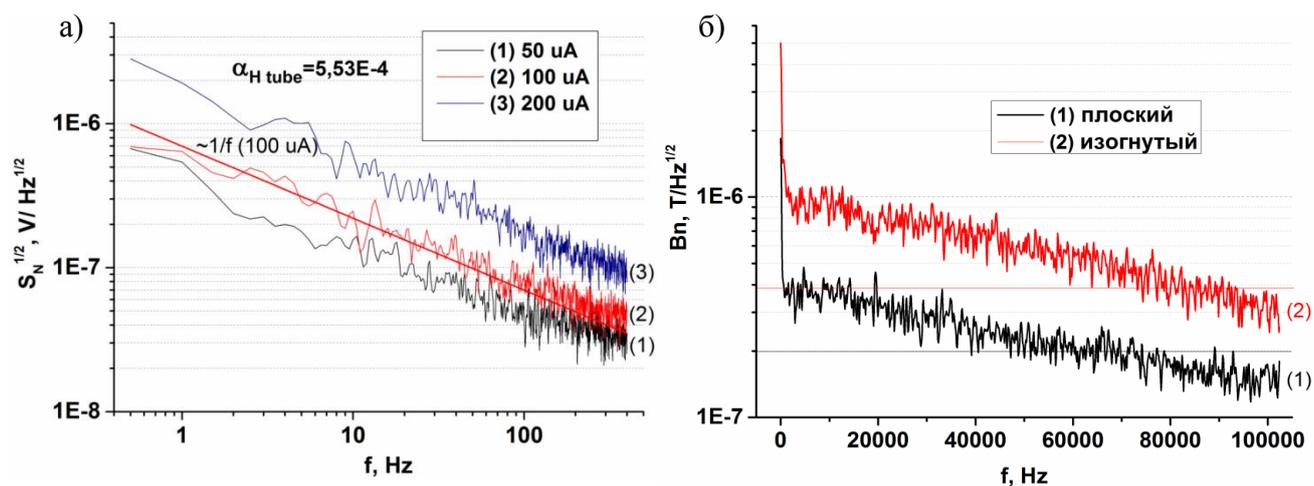


Рисунок 5 – Спектры: а) $1/f$ - шума изогнутого холловского мостика для токов $I=50, 100, 200$ мкА; б) шума эквивалентного магнитному полю плоского (1) и изогнутого (2) холловского мостика при токе $I = 200$ мкА

Исследована возможность защиты изогнутых тонкопленочных микродатчиков от внешних механических воздействий, путем запечатывания в матрицу полидиметилсилоксана (ПДМС) (Рисунок 6а). Непосредственно перед запечатыванием микротрубок образец помещался в этиловый эфир уксусной кислоты - типичный органический растворитель полидиметилсилоксана. Затем образец помещался в неполимеризованный ПДМС. Полимер замещал этиловый эфир, находящийся внутри микротрубок, а также покрывал трубки на поверхности образца снаружи, как показано на Рисунке 6б. Установлено, что запечатывание в полимерную матрицу повышает устойчивость к внешним воздействиям среды и не приводит к ухудшению характеристик микродатчиков. Показано, что магнитополевые и угловые зависимости до и после покрытия ПДМС были одинаковыми в пределах ошибки измерений.

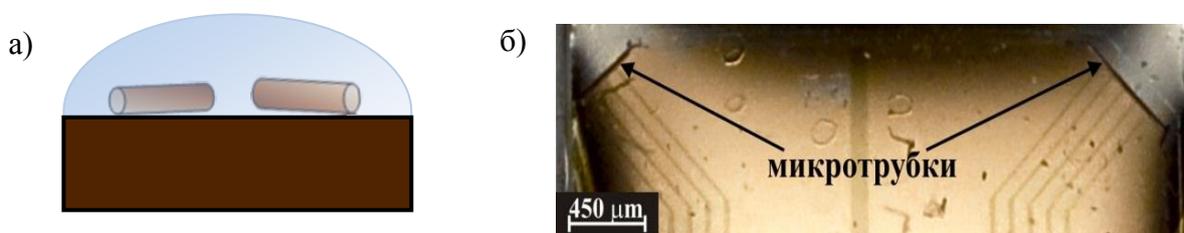


Рисунок 6 – Запечатывание датчика в матрицу полидиметилсилоксана (ПДМС): а) схематическое изображение образца с микротрубками в ПДМС; б) фотография (вид сверху) образца в ПДМС

В четвертой главе была предложена конструкция бесконтактного плазмонноусиленного магнитооптического датчика на основе гибридной металл-диэлектрической наноструктуры. Структура представляет собой периодический массив серебряных наночастиц, встроенных в пленку висмут замещенного иттриевого феррит граната (Bi:YIG), расположенную на поверхности серебряной подложки (Рисунок 7а). С помощью численного моделирования исследованы спектры отражения и оптический отклик магнитооптического датчика на основе наноструктуры с взаимодействующими бегущим и локализованным плазмонами. Датчик был спроектирован таким образом, чтобы усиление магнитооптического отклика за счет плазмонных резонансов наблюдалось в видимом и ближнем ИК диапазонах. Поскольку предложенная гибридная наноструктура содержит большое количество геометрических параметров, целью численного моделирования являлась оптимизация геометрических параметров наноструктуры для улучшения следующих характеристик магнитооптического бесконтактного датчика: абсолютного магнитооптического отклика $\delta_{abc} = R(+M) - R(-M)$, коэффициента отражения R и

чувствительности S_{MO} . Численный расчет структур и моделирование спектров проводилось с помощью программы CST Microwave studio 2015. Для задания оптических констант материала в магнитном поле в модели был использован встроенный «Create Full Tensor Material». Для ферромагнитного диэлектрика Bi:YIG при расчетах использовались следующие величины диагональных и недиагональных компонент тензора $\hat{\epsilon}^{MO}$: $\epsilon_{xx} = 4.84 + 0.00484i$ и $g = 0.02$. Оптические постоянные серебра были аппроксимированы моделью Друде.

Предложенная магнитооптическая наноструктура поддерживает два типа плазмонов. В серебряных наночастицах проявляется локализованный плазмонный резонанс (ЛПР), положение которого определяется ее геометрическими размерами. В металлической пленке может распространяться поверхностный плазмон-поляритон (ППП), условие возбуждения которого определяется периодом структуры и углом падения, в соответствии с формулой:

$$k_{spp} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_m \epsilon_d}{\epsilon_m + \epsilon_d}} = k_0 \sin \theta + nG,$$

где k_0 - волновой вектор падающей волны, θ - угол падения, ϵ_m и ϵ_d - диэлектрические проницаемости металла и диэлектрика соответственно, G - вектор обратной решетки, ω - частота падающего света, c - скорость света в вакууме, n - целое число.

Методом численного моделирования получены спектры отражения предложенной конструкции магнитооптического датчика (Рисунок 7б). В результате расчетов были определены оптимальные параметры наноструктуры: периоды структуры $P_x = 1000$ нм и $P_y = 600$ нм, толщина диэлектрика $t = 80$ нм, ширина, длина и толщина частиц составляли $w = 100$ нм, $l = 160$ нм, $h = 50$ нм соответственно.

За счет оптимизации достигнуто высокое значение коэффициента отражения датчика, необходимое для практического применения, за счет использования серебрянной подложки и обладающего малыми потерями ферромагнитного диэлектрика. Было показано, что варьирование угла падения света приводит к сближению двух провалов в зависимости коэффициента отражения структуры, обусловленных бегущим и локализованным плазмонами.

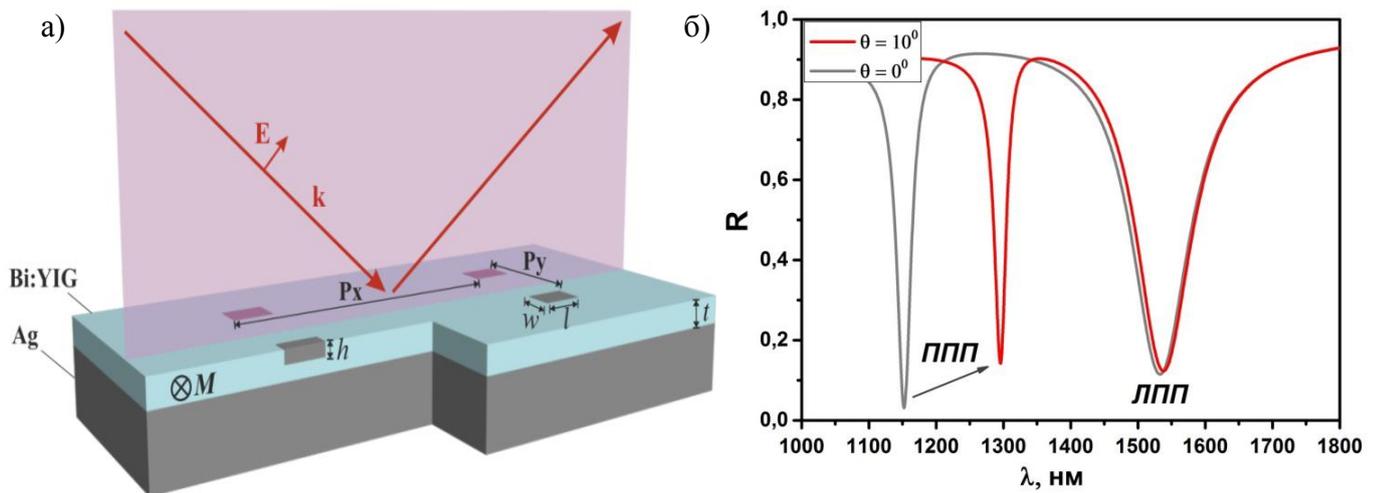


Рисунок 7 – Магнитооптический датчик: а) геометрия структуры, содержащей серебряные наночастицы Ag и слой ферромагнитного диэлектрика Bi:YIG, намагниченного перпендикулярно плоскости падения света; б) расчетные спектры отражения при углах падения 0° и 10° в отсутствии внешнего магнитного поля. На вставке показаны зависимости коэффициента отражения при угле падения $\theta = 10^{\circ}$ при различных ориентациях вектора намагниченности $R(M)$ и $R(-M)$ в районе длины волны 1300 нм

Методом численного моделирования был исследован магнитооптический отклик δ_{abc} предложенной конструкции магнитооптического датчика. На Рисунке 8а приведен спектр магнитооптического отклика (сплошная красная линия) в сравнении со спектром отражения наноструктуры (штрих-пунктирная линия). При угле падения $\theta = 10^{\circ}$ получено существенное резонансное усиление магнитооптического отклика, максимальное абсолютное значение которого составило $\delta_{abc} = 0.04$, что на два порядка превышает величину δ_{abc} датчиков без плазмонов.

Для рассмотрения механизма усиления магнитооптического отклика датчика была построена карта распределения электрического поля (Рисунок 8б). Из графика видно, что в данной системе при угле падения $\theta = 10^{\circ}$ вместо «чистых» бегущего и локализованного плазмонов имеет место их гибридное состояние, вызванное взаимодействием.

Проанализированы сферы практического применения магнитооптического датчика и показано, что предложенная наноструктура является перспективной для создания датчиков магнитного поля. Чувствительность датчика к магнитному полю на крутом склоне кривой спектра отражения достигает своего максимального значения.

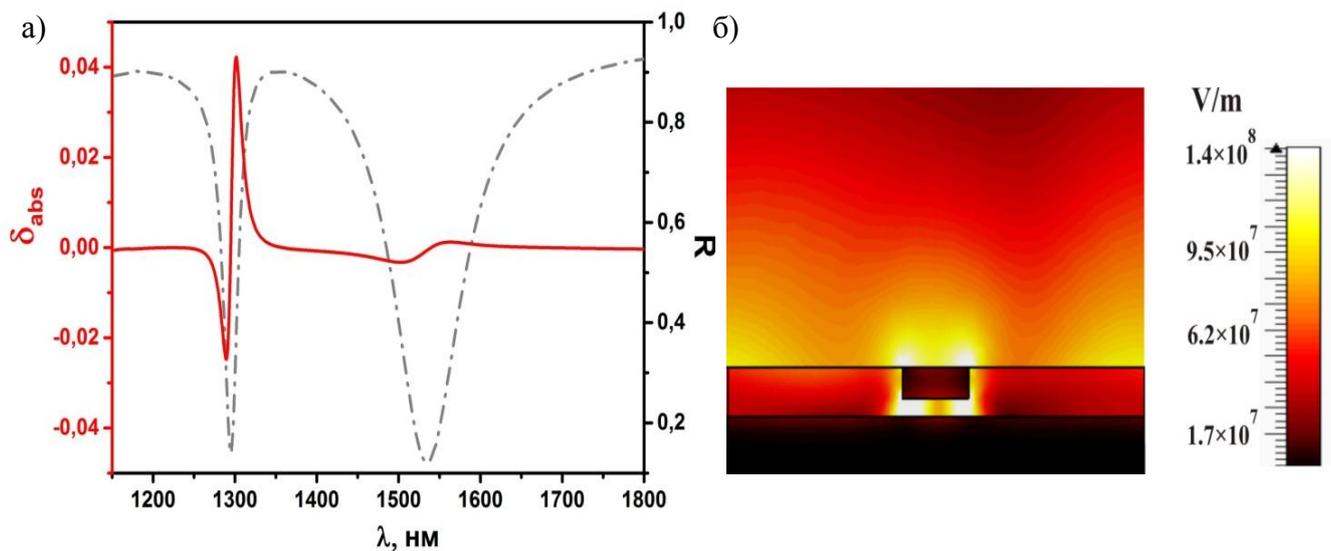


Рисунок 8 – Усиление магнитооптического отклика датчика: а) расчетные спектр отражения (штрих-пунктирная линия) и магнитооптический отклик (сплошная красная линия) предложенной наноструктуры; б) распределение электрического поля для длины волны падающего света $\lambda=1300$ нм и при угле падения равном 10^0

Чувствительность S_{MO} магнитооптического датчика к магнитному полю определяется как изменение абсолютного МО отклика при приложении внешнего магнитного поля. С учетом того, что величина намагниченности насыщения висмут-замещенного феррит-граната составляет $M_s=0.16$ Тл, чувствительность датчика в линейной области кривой намагниченности составляет $S_{MO} = \frac{\delta_{abs}}{M_s} = 0.25/\text{Тл}$. Поскольку внешнее магнитное поле может быть промодулировано, то отношение сигнал шум датчика может быть существенно улучшено с применением техники синхронного детектирования [7].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа посвящена разработке и оптимизации электрических и оптических микродатчиков магнитного поля. Для формирования локальных трехосевых датчиков магнитного поля была применена уникальная технология сворачивания напряженных полупроводниковых нанопленок. В ходе работы были впервые разработаны и изготовлены лабораторные образцы миниатюрных трубчатых трехосевых холловских датчиков и исследованы их характеристики. Была предложена оригинальная конструкция плазмонноусиленного магнитооптического датчика и методами численного моделирования была оптимизирована наноструктура с плазмон-плазмонным взаимодействием, обладающая высоким магнитооптическим откликом (усиление до 100 раз по сравнению со случаем без плазмонов).

Основные результаты и выводы работы, заключаются в следующем:

1) Разработана конструкция и изготовлены образцы трехосевых холловских датчиков на основе микротрубок GaAs/AlGaAs/InGaAs, содержащих двумерный электронный газ с концентрацией и подвижностью электронов $n_{2D} = 1.33 \cdot 10^{12} \text{см}^{-2}$ и $\mu = 4700 \frac{\text{см}^2}{\text{В}\cdot\text{с}}$ соответственно. Продемонстрировано одновременное локальное измерение микродатчиком всех трех компонент вектора магнитного поля в пространстве.

2) Показано, что конструкция трехосевых холловских датчиков на основе полупроводниковых микротрубок позволяет создавать миниатюрные датчики с размерами активной области $500 \times 20 \times 20$ мкм (объем $< 10^{-3}$ мм³) для локального измерения величины и градиента магнитного поля.

3) Проведены исследования магнитолевых и шумовых характеристик изготовленных датчиков и проанализирована возможность применения изготовленных структур для измерения слабых магнитных полей. Показано, что относительная чувствительность изогнутых холловских мостиков к магнитному полю достигает $S_I = 470 \pm 14 \frac{\text{Ом}}{\text{Тл}}$ при $T=300$ К. Из результатов измерений спектральной плотности шума получен порог чувствительности V_N , и его величина составляет $400 \text{ нТл}/\text{Гц}^{1/2}$.

4) Установлено, что тонкопленочные трубчатые холловские датчики помещенные в матрицу полидиметилсилоксана (ПДМС) являются более устойчивыми к внешним воздействиям среды. Показано, что магнитолевые и угловые зависимости до и после покрытия ПДМС были одинаковыми в пределах ошибки измерений.

5) Предложен и оптимизирован с помощью численного моделирования магнитооптический датчик на экваториальном эффекте Керра на основе многослойной

металл-диэлектрической трехмерной наноструктуры. Показано, что величина абсолютного магнитооптического отклика плазмонноусиленного магнитооптического датчика достигает $\delta_{abc} = 0.04$, что на два порядка превышает величину δ_{abc} датчика без плазмонов. Высокий коэффициент отражения датчика ($R > 0.3$) достигается за счет использования серебряной подложки и ферромагнитного диэлектрика, обладающего малыми омическими потерями.

б) Показано, что чувствительность нанодатчика магнитного поля в линейной области кривой намагниченности составляет $S_{MO} = 0.25/\text{Тл}$. Гибридная металл-диэлектрическая наноструктура является перспективной для дистанционной регистрации магнитных полей, а также для применения в качестве биосенсоров.

Публикации в изданиях, входящих в Перечень ВАК:

- 1) Vorob'ev, A. B. Three-axis Hall transducer based on semiconductor microtubes / A. B. Vorob'ev, A. V. Chesnitskiy, A. I. Toropov, V. Y. Prinz // Applied Physics Letters. – 2013. – Vol. 103. – №. 17. – P. 173513.
- 2) Чесницкий, А. В. Порог чувствительности изогнутых холловских мостиков InGaAs/AlGaAs/GaAs / А. В. Чесницкий, Е. А. Михантьев // Микроэлектроника. – 2016. – Т. 45. – №. 2. – С. 112–118.
- 3) Chesnitskiy, A. V. Transverse Magneto-Optical Kerr Effect in Strongly Coupled Plasmon Gratings / A. V. Chesnitskiy, A. E. Gayduk, V. Y. Prinz // Plasmonics. – 2018. – Т. 13. – №. 3. – P. 885-889.

Патент на изобретение

«Датчик магнитного поля и способ его изготовления», №2513655, дата приоритета: 12.10.2012, авторы: Воробьев А.Б., Чесницкий А.В., Принц В.Я., патентообладатель: Федеральное государственное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук (ИФП СО РАН).

Публикации в трудах конференций:

- 1) Vorob'ev, A. B. Three-axis Hall sensor based on strained modulation doped semiconductor shells / A.B. Vorob'ev, A.V. Chesnitskiy, E.V. Ilyushina, A. I. Toropov, V.Ya Prinz . // 19 Int. Symp. "Nanostructures: physics and technology", Russia, Ekaterinburg, 20–25 June, 2011. – P. 150–151.
- 2) Воробьев, А. Б. Трёхосевой датчик Холла на основе полупроводниковых оболочек / А. Б. Воробьев, А. В. Чесницкий, Е. В. Илюшина, А. И. Торопов, В. Я. Принц // X Российская конференция по физике полупроводников «Полупроводники-2011», тезисы конференции, г. Россия, Нижний Новгород, 19-23 сентября, 2011. – С. 223.

- 3) Чесницкий, А. В. Трехосевой датчик Холла на основе полупроводниковых оболочек / А. В. Чесницкий, А. Б. Воробьев // 13-я Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике, тезисы конференции, Россия, Санкт-Петербург, 21–25 ноября, 2011. – С. 89.
- 4) Воробьев, А.Б. Статический скин-эффект в двумерном электронном газе на цилиндрической поверхности при высоких температурах / А. Б. Воробьев, А.В. Чесницкий, Е.В. Козик, А.И. Торопов // XI Российская конференция по физике полупроводников «Полупроводники-2013», Тезисы конференции, Россия, Санкт-Петербург, 16 - 20 сентября, 2013. – С. 267.
- 5) Воробьев, А.Б. Статический скин-эффект в двумерном электронном газе на цилиндрической поверхности при высоких температурах / А.Б. Воробьев, А.В. Чесницкий, Е.В. Козик, А.И. Торопов // XX Уральская международная зимняя школа по физике полупроводников, Программа и тезисы докладов, Екатеринбург, 17 – 22 февраля, 2014. – С. 112– 113
- 6) Vorob'ev, A. B. Static skin effect in two dimensional electron gas on cylindrical surface at high temperatures / A. B. Vorob'ev, A. V. Chesnitskiy, E. V. Kozik, A. I. Toropov // 22 Int. Symp. “Nanostructures: physics and technology”, Russia, Saint Petersburg, 23-27 June, 2014. – P. 35.
- 7) Chesnitskiy A. V. Transverse magneto-optical Kerr effect in strongly coupled plasmon gratings / A.V. Chesnitskiy, A.E. Gayduk, V.Ya Prinz // 24 Int. Symp. “Nanostructures: physics and technology”, Russia, Saint Petersburg, 26 June -1 July, 2016. – P. 125.

Список цитируемой литературы

- 1) Бараночников, М. Л. Микромагнитоэлектроника / М.Л. Бараночников // Москва: ДМК Пресс, – 2001. – Т. 1. – 544 с.
- 2) Сысоева, С. Датчики близости/положения/расстояния. Важные обновления и дальнейшие перспективы / С. Сысоева // Компоненты и технологии. – 2008. – №. 3. – С. 44-54.
- 3) Armelles, G. Magnetoplasmonics: combining magnetic and plasmonic functionalities / G. Armelles G [et al.] // Advanced Optical Materials. – 2013. – Vol. 1. – №. 1. – P. 10-35.
- 4) Vorob'ev, A. B. Directional rolling of strained heterofilms / A. B. Vorob'ev, V. Y. Prinz // Semiconductor science and technology. – 2002. – Vol. 17. – №. 6. – P. 614.
- 5) Prinz, V. Y. Free-standing and overgrown InGaAs/GaAs nanotubes, nanohelices and their arrays / V. Y. Prinz [et al.] // Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures. – 2000. – Vol. 6. – №. 1-4. – P. 828-831.
- 6) Vorob'ev, A. B. Giant asymmetry of the longitudinal magnetoresistance in high-mobility two-dimensional electron gas on a cylindrical surface / A. B. Vorob'ev [et al.] // Physical Review B. – 2007. – Vol. 75. – №. 20. – P. 205309.
- 7) Chou, K. H. Application of strong transverse magneto-optical Kerr effect on high sensitive surface plasmon grating sensors / K. H. Chou [et al.] // Optics express. – 2014. – Vol. 22. – №. 16. – P. 19794-19802.

Подписано в печать: 6.12.2018

Объем: 1 усл.п.л.

Тираж: 100 экз. Заказ № 104

Отпечатано в типографии «Реглет»

117485, г. Москва, ул. Профсоюзная д.102, стр.1

(495) 979-13-53 www.reglet.ru