



УТВЕРЖДАЮ

Врио проректора по научной
работе и международной
деятельности,
к.т.н., доц.

Алтухов А.Ю.

«10» февраля 2025 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Джалолиддинзоды Мухаммадусуфа «Синтез наногранулированных структур в системах полупроводник GaSb - ферромагнетики MnSb и GaMn», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.2.3 – «Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники»

Актуальность Магниточувствительные материалы привлекают к себе значительное внимание при разработке большого количества устройств, таких как магнитные запоминающие устройства, коммуникационные средства, вычислительные технологии и различных типов магнитных сенсоров. Их создание основывается на фундаментальных физических явлениях, включающих взаимодействие внешнего магнитного поля с орбитальными магнитными моментами электронов, что приводит к возникновению силы Лоренца и росту электросопротивления. Кроме того, важную роль играют эффекты анизотропного магнетосопротивления, а также гигантского и туннельного магнетосопротивления в спин-поляризованных структурах, в зависимости от степени спиновой поляризации. Эти материалы широко применяются при создании устройств спинтроники.

Спин-поляризованные структуры могут представлять собой многослойные или гранулированные системы. Формирование многослойных структур, как правило, осуществляется методом молекулярно-лучевой эпитаксии, тогда как гранулированные композиты могут быть получены более доступными технологическими методами. Существенным преимуществом гранулированных структур является их однослойность, а также состав, включающий ферромагнитные наногранулы, распределенные в немагнитной матрице. В данной работе в качестве материала матрицы использовано полупроводниковое соединение GaSb, отличающееся высокой подвижностью носителей заряда и

значительной длиной их свободного пробега, что является одним из оснований для создания условий по манипуляции спиновой подсистемой в магнитоэлектронном устройстве.

Целью диссертации являлась разработка физико-химических основ технологии магниточувствительных материалов в системах ферромагнетик – полупроводник, где ферромагнетики MnSb и GaMn, а полупроводник GaSb.

В качестве ферромагнитных компонентов выбраны магнитомягкий ферромагнетик MnSb (с температурой Кюри ~ 590 К) и магнито жесткий материал GaMn. Одним из ключевых аспектов при создании гранулированных структур является исследование взаимодействия между фазами, составляющими данную систему.

Выбор полупроводника GaSb в качестве матрицы обосновывается тем, что он обладает высоким значением подвижности (~ 4000 см²/В·с) и концентрацией носителей заряда ($\sim 10^{17}$ см⁻³), а использование ферромагнетиков MnSb и GaMn в качестве магнитных включений обосновывается тем, что они обладают высокой температурой Кюри (~ 590 К), также согласно литературным данным MnSb относится к магнитомягким, а GaMn (с коэрцитивной силой $H_c \sim 4$ кЭ) к магнито жестким ферромагнетикам.

Научная новизна работы В работе синтезированы и идентифицированы сплавы GaSb- MnSb с содержанием 41 и 70 мол.% MnSb. Исследовано влияние скорости кристаллизации на однородность распределения и размер кристаллитов фаз. Экспериментально изучены спектральные зависимости эффекта Керра в композитах GaSb-MnSb, которые подтвердили наличие ферромагнетизма в них. Показано, что с ростом скорости кристаллизации, особенно в режимах закалки, происходит увеличение однородности распределения фаз и уменьшение размеров их кристаллитов. Построена диаграмма состояния GaMn - GaSb, установлен эвтектический характер взаимодействия между этими фазами, определены координаты эвтектики, установлены условия синтеза магнитотвердого ферромагнетика на основе GaMn для составов с температурой ниже перитектического превращения.

Разработка методики синтеза пленок MnSb, основанного на послойном вакуумно-термическом напылении в высоком вакууме ($\sim 10^{-4}$ Па) слоев Mn и Sb с последующим их температурным отжигом без разгерметизации установки, изучение влияния скорости кристаллизации на структуру и свойства композитов GaSb-MnSb и построение диаграммы состояния GaMn – GaSb с установлением координат эвтектики обеспечили диссертационной работе научную новизну и практическую значимость.

Достоверность результатов Достоверность полученных результатов подтверждается использованием современных, хорошо апробированных методов исследований на аттестованных установках; а также хорошим согласованием экспериментальных данных с теоретическими представлениями, вытекающими из оригинальных и общепринятых физико-химических моделей.

Практическая значимость работы В диссертации разработаны методики получения сплавов GaSb- MnSb, GaMn - GaSb и пленок MnSb, основанной на послойном вакуумно-термическом напылении прекурсоров в высоком вакууме с последующим их температурным отжигом с высокими значениями температуры Кюри и проявляющимся магнитооптическом эффекте.

Рекомендации по использованию результатов и выводов, приведенных в диссертации В работе получены результаты, которые представляют интерес для специалистов, занимающихся исследованиями и разработками различных типов датчиков температуры и магнитного поля. Результаты и выводы диссертации могут быть использованы в ряде научных организаций и промышленных предприятий РФ, включая региональный центр нанотехнологий ЮЗГУ, МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, НИУ БелГУ и др.

Оценка структуры и содержание работы Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка использованной литературы, изложена на 163 страницах машинописного текста, содержит 85 рисунков. Список используемой литературы включает 187 источников.

Во введении сформулированы цель работы и задачи исследования подчеркнуты его актуальность, научная новизна, теоретическая и практическая значимость,

изложены основные положения, выносимые на защиту. Также описан личный вклад автора, приведены сведения об апробации работы и публикациях, в которых излагаются основные результаты исследования.

В первой главе представлен обзор литературных данных, посвященный изучению выбранных материалов — MnSb, GaMn и GaSb. Рассмотрены результаты ранее опубликованных исследований, охватывающих их физико-химические свойства, кристаллическую структуру, а также электрические и магнитные характеристики. Приведены диаграммы состояния системы GaSb–MnSb.

Во второй главе детально описаны методики синтеза и исследования свойств материалов MnSb, GaMn и GaSb. Для анализа синтезированных образцов применены рентгеноструктурный анализ, дифференциально-термический анализ, сканирующая электронная микроскопия и магнитооптические исследования. Также подробно рассмотрены и обоснованы методики получения тонкопленочных структур MnSb и композитов GaSb–MnSb.

Третья глава посвящена разработке методики синтеза тонких пленок ферромагнетика MnSb, основанной на последовательном осаждении металлов Sb и Mn с последующим термическим отжигом без разгерметизации установки. В рамках исследования проведены расчеты плотностей потоков конденсации паров Mn и Sb, а также определены скорости роста пленочных структур, что позволило оптимизировать технологические параметры синтеза. Приведены результаты получения объемных кристаллов MnSb вакуумно-ампульным методом, а также их электрические и магнитные характеристики.

В четвертой главе рассмотрены процессы синтеза и исследования композитных структур GaSb–MnSb с различным содержанием ферромагнитной фазы MnSb, включая эвтектический состав (59 мол.% GaSb – 41 мол.% MnSb) и заэвтектический состав (30 мол.% GaSb – 70 мол.% MnSb). Оценено влияние скорости кристаллизации на дисперсность магнитной фазы: увеличение скорости охлаждения с 0,1 °C/с до 60 °C/с привело к уменьшению размеров кристаллитов MnSb с 20 мкм до 0,8–1 мкм. Исследование магнетосопротивления выявило наличие спиновой поляризации в эвтектическом составе, закаленном при

определенных условиях. Зафиксировано отрицательное магнетосопротивление на уровне 1% для образца состава 59 мол.% GaSb – 41 мол.% MnSb при температуре 300 К и напряженности магнитного поля 0,13 Т.

В пятой главе представлены результаты построения диаграммы состояния системы GaMn–GaSb, полученные на основе дифференциально-термического анализа, микроструктурного анализа и рентгенофазового анализа. Установлено наличие эвтектической реакции в данной системе, а также определены координаты эвтектической точки, соответствующие 45 мол.% GaMn и 55 мол.% GaSb при температуре эвтектики 609 °С. Показано, что температуры ликвидуса данной системы находятся ниже температуры перитектического разложения GaMn (~840 °С), что определяет технологические условия стабилизации фазы жесткого ферромагнетика GaMn.

В заключении кратко сформулированы наиболее важные результаты работы

Ключевые результаты диссертационного исследования:

- Разработан и реализован метод синтеза тонкопленочного ферромагнетика MnSb путем вакуумно-термического напыления с последующим термическим отжигом непосредственно после осаждения. Это позволило существенно снизить трудоемкость процесса и исключить риск окисления металлов (особенно Mn, подверженного быстрому окислению) после разгерметизации рабочей камеры.
- Получены объемные кристаллы ферромагнетика MnSb, а также композиты GaSb–MnSb и GaSb–GaMn, сформированные вакуумно-ампульным методом. Идентификация полученных материалов выполнена с использованием рентгенофазового анализа (РФА), дифференциально-термического анализа (ДТА) и микроструктурного анализа. Проведены исследования их электрических и магнитных свойств.
- Установлено, что синтезированные образцы MnSb обладают температурой Кюри ~580 К и низкой коэрцитивной силой ~5,9 Э, что свидетельствует об их принадлежности к магнитомягким ферромагнетикам.
- Показано, что с увеличением скорости кристаллизации сплавов 59 мол.% GaSb – 41 мол.% MnSb, включая режимы закалки, наблюдается более равномерное

распределение фаз за счет ограничения диффузии атомов, а также уменьшение размеров кристаллитов MnSb с 20 мкм до 0,8–1 мкм. Кроме того, зафиксировано появление отрицательного магнетосопротивления.

- Изучено фазовое равновесие системы GaSb–GaMn и установлены параметры эвтектической реакции, координаты которой составляют 45 мол.% GaMn и 55 мол.% GaSb при температуре эвтектики 609 °С. Показано, что температуры ликвидуса данной системы ниже температуры перитектического разложения (~840 °С), что определяет технологические условия стабилизации фазы с упорядоченной структурой L1₀-GaMn.
- Установлено, что для обеспечения фазовой стабильности необходимо проводить термический отжиг при 800 °С в течение 72 часов с последующим охлаждением до комнатной температуры. Контроль параметров синтеза осуществлялся с использованием PID-регуляторов (Termodat) с точностью ±1 °С.

Диссертация написана понятным языком, достаточно хорошо оформлена, хотя, как в тексте работы, так и в рисунках, имеется ряд ошибок.

Замечания по диссертационной работе

По рассматриваемой диссертационной работе имеется несколько замечаний:

- 1) Автор указывает на использование вольтамперных характеристик (ВАХ) для проверки качества контактов, однако данные характеристики не представлены в тексте работы. Включение соответствующих графиков (ВАХ) или таблиц значительно улучшило бы доказательную базу.
- 2) Полученное значение отрицательного магнетосопротивления (-1%) на рисунке 77 (стр. 130) является достаточно малым по сравнению с известными данными для других материалов и не может быть значимым результатом без определения его фундаментальных причин.
- 3) Не вполне понятен термин «однослойные» при его применении к гранулированным структурам. Каков был критерий однослойности?
- 4) В работе нет единообразия по использованию систем физических величин. В разных главах при описании магнитных величин (магнитная индукция,

напряженность магнитного поля намагниченность) используются, как величины в системе СИ, так и в системе СГС, причем они попеременно обозначены величинами и размерностями, как на русском, так и на английском языке, что затрудняет оценку результатов. В работе имеются орфографические и грамматические ошибки, что несколько снижает общее восприятие текста.

Данные замечания не снижают общую высокую оценку работы, которая выполнена на современном научно – техническом уровне, а ее результаты могут быть использованы в научном и прикладном плане.

Заключение

Сделанные замечания имеют рекомендательный характер и не влияют на оценку диссертационной работы Джалолиддинзоды М. Работа выполнена на достаточно хорошем теоретическом и экспериментальном уровне, полученные результаты являются новыми и имеют научную и практическую значимость. Это позволяет утверждать, что обозначенные в работе цели и задачи исследования достигнуты, а положения, выносимые на защиту, экспериментально доказаны. Основные результаты диссертационной работы отражены в 4 научных статьях в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК, и индексируемых в международных базах данных Scopus.

Диссертационная работа Джалолиддинзоды Мухаммадиосуфа «Синтез наногранулированных структур в системах полупроводник GaSb - ферромагнетики MnSb и GaMn», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук, соответствует всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г. (в редакции от 11.09.2021 г.), а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.3 - Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники.

Диссертация рассмотрена, а отзыв обсуждён и одобрен после доклада соискателя на объединенном семинаре Регионального центра нанотехнологий и кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Юго-Западном государственном университете «б» февраля 2025 г., (протокол № 1 от 06.02.2025).

Отзыв, составленный по итогам семинара, подписан: директором Регионального центра нанотехнологий ЮЗГУ, доктором физико-математических наук, доцентом, профессором кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики ЮЗГУ Пугачевским Максимом Александровичем (специальность 1.3.8 – физика конденсированного состояния, тел. +7(4712) 22-26-05, e-mail: rmaximal@mail.ru) и заведующим кафедрой нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики ЮЗГУ, к.ф.-м.н., доц. Кузько Андреем Евгеньевичем (специальность 1.3.8 – физика конденсированного состояния, тел. +7(4712) 22-24-62, e-mail: kuzko@mail.ru)

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Юго-Западный государственный университет", г. Курск
Адрес: 305040, Курская область, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94

Директор Регионального центра нанотехнологий ЮЗГУ,
д.ф.-м.н, доцент

М.А. Пугачевский

Заведующим кафедрой нанотехнологий,
микроэлектроники, общей и прикладной физики,
к.ф.-м.н., доц

А.Е. Кузько



М.А. Пугачевский, А.Е. Кузько