

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу БУСУРИНОЙ МАРИИ ЛЕОНИДОВНЫ

«САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩИЙСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ СИНТЕЗ, СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СПЛАВОВ ГЕЙСЛЕРА НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ Ti-Al-Me (Me = Co, Fe и Cu)»,

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.17 «Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества».

Современная эпоха - эпоха информационных технологий, в которой ключевую роль играет развитие искусственного интеллекта на основе вычислительных систем. На сегодняшний день производительность суперкомпьютеров, работающих на традиционной архитектуре, все еще недостаточна для выполнения очень сложных трудоемких операций, воспроизводящих работу биологической нейронной сети. Размеры транзисторов кремниевых процессоров уже в ближайшие 5-10 лет достигнут своего физического предела на уровне 5-7 нм, поэтому ученые активно ведут поиск, разрабатывают и исследуют новые физические принципы и материалы, на основе которых будут созданы быстродействующие устройства с экстремально малым энергопотреблением и низким тепловыделением.

Спинтроника является сегодня одной из активно развивающихся областей микро- и наноэлектроники. В устройствах спинтроники энергию или информацию переносит не заряд электрона, а его спин. Устройства спинтроники позволяют значительно увеличить скорость передачи и обработки информации, плотность ее записи на носители, а также снизить энергопотребление. Материалы для создания устройств спинтроники должны обладать свойством спиновой поляризации, контролируемой с помощью магнитного поля. Одними из таких материалов, проявляющих свойства спиновой поляризации являются интерметаллидные сплавы Гейслера.

В связи с вышесказанным, **актуальность темы диссертационной работы**

представляется очевидной, так как она посвящена получению и исследованию свойств уникального класса интерметаллидов – сплавов Гейслера, перспективных материалов для спинтроники. В работе показана возможность использования метода самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), для синтеза сплавов Гейслера как технологически упрощенного и энергоэффективного способа получения таких интерметаллидов.

Структура и содержание диссертации

Диссертация Бусуриной М.Л. имеет объём 147 страниц, состоит из введения, пяти глав, выводов, списка используемой литературы из 179 наименований и двух приложений.

Во введении диссертационной работы обоснована актуальность темы исследований, сформулированы цели и задачи работы, представлены научная новизна и практическая значимость результатов, сформулированы защищаемые положения.

Первая глава диссертационной работы посвящена обзору научных публикаций по теме диссертационного исследования. В главе кратко представлена характеристика интерметаллидных сплавов, приведен сравнительный анализ основных методов получения интерметаллидов, включая классификацию современных СВС-процессов. Подробно описаны свойства и применения интерметаллидных сплавов на основе тройных систем Me-Ti-Al, к которым относятся и сплавы Гейслера, как перспективные материалы для микро- и нанoeлектроники. В результате анализа литературных данных сделан вывод об актуальности исследования сплавов Гейслера на основе тройных интерметаллидных систем Me-Ti-Al и возможности их получения методом СВС, а также системных исследований процессов структуро- и фазообразования сплавов Гейслера в процессе СВС.

Во **второй главе** подробно описаны экспериментальные методики и установки, использованные в диссертационной работе для решения поставленных задач, представлены характеристики исходных компонентов для

синтеза материалов, методы анализа свойств синтезированных продуктов.

Третья глава, самая объемная по содержанию, посвящена исследованию процесса СВС в системе 2Co-Ti-Al. Описаны особенности горения прессованных образцов из реакционной порошковой смеси. Детально исследована микроструктура и элементный анализ синтезированного продукта. Исследована эволюция фазового состава в процессе СВС с помощью метода времяразрешающей рентгеновской дифрактометрии. Продемонстрирована возможность получения плотного продукта с пористостью <3% методом СВС-прессования. Также продемонстрирован способ получения порошкового продукта CoTiAl путем механоактивационной обработки реакционной смеси в течение 5 мин. Проведены исследования электрических и магнитных свойств синтезированного методом СВС продукта Co₂TiAl и показано соответствие свойств аналогичного сплавов, синтезированных другими методами.

В **четвертой главе** рассматривается получение сплава Гейслера на основе системы 2Fe-Ti-Al методом СВС. Показано, что формирование интерметаллидного сплава Гейслера Fe₂TiAl возможно лишь при оптимально подобранных условиях эксперимента (определенных режимах нагрева, размерах частиц исходной смеси, условий теплопередачи и т.д.). На основе результатов экспериментов на слоевых системах предложен механизм фазообразования в системе 2Fe-Ti-Al в процессе СВС. Проведено измерение зависимости удельного электросопротивления в широком диапазоне температур и сделан пересчет полученных значений с учетом пористости синтезированного продукта. Измерены также магнитные характеристики полученного продукта.

Пятая глава посвящена получению сплава Гейслера в системе 2Cu-Ti-Al методом СВС. В отличие от предыдущих систем, в которых горение происходило в режиме теплового взрыва, синтез интерметаллидного сплава Cu₂TiAl проходил во фронтальном режиме горения. Исследование температурной зависимости удельного электросопротивления синтезированного продукта показало, что в районе 770÷790 К наблюдается увеличение температурного коэффициента

сопротивления практически в два раза, что возможно связано с фазовыми переходами, происходящими в этом температурном интервале. Тем не менее ступенчатый высокотемпературный рентгенофазовый анализ показал температурную стабильности фазового состава синтезированного продукта. Измерение магнитных характеристик продукта синтеза Cu_2TiAl показало его слабую ферромагнитичность.

В заключении приведены основные выводы по диссертационной работе.

По результатам диссертации опубликовано 17 научных работ в рецензируемых научных журналах и трудах конференций, из них 10 статей, входящих в перечень журналов из списка ВАК. В базе данных Web of Science и Scopus представлено 5 публикаций. Получен один патент РФ на изобретение «Способ получения интерметаллидных сплавов Гейслера на основе системы Ti-Al-Me»,

Достоверность результатов

Достоверность и обоснованность и полученных результатов и выводов, приведенных в диссертационной работе Бусуриной М.Л., подтверждается большим объёмом экспериментальных данных, полученных с применением современного аналитического оборудования для микроструктурного анализа, использованием аттестованных методик исследований свойств синтезированных продуктов, а также сопоставлением результатов с существующими литературными данными.

Научная новизна диссертационной работы

1. Впервые методом СВС получены сплавы на основе тройных интерметаллидных соединений Co_2TiAl , Fe_2TiAl , Cu_2TiAl . Исследован их фазовый состав и микроструктура.

2. Впервые методами электронной микроскопии, динамической рентгенографии и проведением модельных экспериментов на слоевых образцах типа «сэндвич» изучены механизмы фазо- и структурообразования сплавов Гейслера Co_2TiAl , Fe_2TiAl , Cu_2TiAl в процессе СВС.

3. Измерены электрофизические и магнитные характеристики сплавов Гейслера Co_2TiAl , Fe_2TiAl , Cu_2TiAl , полученных методом СВС. Показано, что характеристики синтезированных материалов сравнимы со свойствами аналогичных материалов, полученных другими методами. Исследованы физические характеристики материалов (плотность, пористость, микротвердость).

Практическая значимость работы

1. Продемонстрирована возможность синтеза тройных интерметаллидных сплавов на основе фазы Гейслера Me_2TiAl ($\text{Me} = \text{Co}, \text{Fe}, \text{Cu}$) с помощью метода СВС.

2. Показана возможность синтеза плотного интерметаллидного сплава Co_2TiAl методом СВС-прессования с пористостью менее 3 %.

3. Определены возможности применимости метода механоактивации для синтеза сплавов Гейслера в системах 2Me-Ti-Al ($\text{Me} = \text{Co}, \text{Fe}, \text{Cu}$). Показано, что при определённых условиях получение сплава Co_2TiAl возможно после 5 мин механоактивационной обработки исходной реакционной смеси.

4. Определены оптимальные параметры СВС для получения сплавов Гейслера Co_2TiAl , Fe_2TiAl , Cu_2TiAl .

5. Получены магнитные и электрофизические характеристики сплавов Гейслера Me_2TiAl ($\text{Me} = \text{Co}, \text{Fe}, \text{Cu}$), синтезированных методом СВС.

Диссертация Бусуриной М.Л. по содержанию и представленным результатам соответствует паспорту специальности 1.3.17 «Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества».

По диссертационной работе имеются следующие замечания:

- Для полноты картины желательно было бы представить результаты по определению спиновой поляризации ферромагнитных пленок, полученных при магнетронном распылении мишеней из материалов, синтезированных методом СВС.

- В работе не представлены требования к чистоте исходных порошков

металлов и не дано объяснение о влиянии присутствия примесных фаз на свойства синтезированных продуктов.

- Из диссертационной работы осталось неясно, почему метод СКВИД-магнитометрии использовался только для продукта, синтезированного на основе системы 2Co-Ti-Al?

- Для порошка исходной системы 2Cu+Ti+Al отмечено последовательное уширение дифракционных пиков с увеличением времени активации и образованием фазы Cu_9Al_4 . Однако автор не приводит полную дифрактограмму указанного соединения. Также не приводится анализ уширения дифракционных пиков, так как уширение может быть вызвано, как механическими напряжениями, так и значительным уменьшением размера частиц.

- Комментарии на рис. 17 было бы целесообразно внести в подпись к рисунку. Результаты элементного анализа желательно размещать в отдельных таблицах, включение их в рисунки (рис. 2, 3, 9, 15) затрудняет их чтение.

Заключение

Указанные замечания не снижают ценность и значимость диссертационной работы Бусуриной М.Л. Работа является законченным исследованием, выполнена на высоком научном уровне, выводы по результатам работы обоснованы и аргументированы, автореферат диссертации полностью соответствует содержанию диссертационной работы.

Диссертационная работа Бусуриной М.Л. является научно-квалификационной работой и содержит новые научные знания. По объёму полученных результатов и научной значимости диссертационная работа является законченным научным исследованием. По целям и задачам, методам исследования, содержанию и новизне диссертация удовлетворяет требования п.9 "Положения о присуждении ученых степеней" ВАК Российской Федерации, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а её автор Бусурина Мария Леонидовна заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности

1.3.17 – «химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества».

10.11.2021

Рощупкин Дмитрий Валентинович
Директора ИПТМ РАН, заведующий
лабораторией рентгеновской акустооптики,
доктор физико-математических наук

Подпись доктора физико-математических
наук,

Рощупкина Д. В. заверяю

Ученый секретарь ИПТМ РАН

кандидат физико-математических наук

Феклисова Ольга Владимировна



Шифр специальности оппонента - 01.04.10 «Физика полупроводников и диэлектриков»

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук (ИПТМ РАН).

Ул. Академика Осипьяна, д. 6, г. Черноголовка, Московская область, 142432, Россия

Рабочий телефон: 8-496-52-440-58

E-mail: rochtch@iptm.ru