

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента

на диссертацию **Полякова Максима Викторовича**

«Структура и свойства тонких пленок  $\text{CoCrFeNiTi}$ ,  $\text{CoCrFeNiCu}$ ,

синтезированных методом магнетронного напыления из

многокомпонентных мишеней»,

представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук

по специальности 2.6.17 – Материаловедение

### **Актуальность темы диссертации**

Диссертационная работа **Полякова Максима Викторовича** посвящена получению и исследованию тонких плёнок высокоэнтропийных сплавов  $\text{CoCrFeNiTi}$ ,  $\text{CoCrFeNiCu}$ . Высокоэнтропийными сплавами называют сплавы, которые содержат не менее 5 элементов, при этом, как правило, элементы находятся в равной атомной доле. Структура таких сплавов представляет собой твёрдый раствор замещения, причём разница в размерах атомов приводит к деформации кристаллической решётки, которая предположительно и обуславливает уникальные механические, физические и химические свойства высокоэнтропийных сплавов. Актуальность данной диссертационной работы обусловлена тем, что высокоэнтропийные сплавы начали активно изучать только в последние 10 лет, причём основная часть работ посвящена высокоэнтропийным сплавам, находящимся в массивном состоянии. При этом до настоящего времени остаётся много вопросов, связанных с механизмами формирования структуры таких сплавов, а также их свойств, в том числе термостабильности. Исследование высокоэнтропийных сплавов в тонкоплёночном состоянии позволит не только получить новую фундаментальную информацию об этом классе материалов, но также и расширить границы области их практического применения.

### **Структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и 1 приложения. Общий объём работы составляет 174 страницы, включая 89 рисунков и 19 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 144 наименования.

**Первая глава** представляет собой литературный обзор, в котором рассмотрены критерии образования высокоэнтропийных сплавов, методы получения высокоэнтропийных сплавов в объёмном и тонкоплёночном состоянии. Проанализированы известные на момент написания диссертации результаты исследований термической стабильности и свойств сплавов:

CoCrFeNiCu, CoCrFeNiTi.

**Вторая глава** посвящена описанию условий получения тонкоплёночных образцов методом магнетронного распыления. Детально описаны методики подготовки образцов для проведения исследований влияния условий магнетронного распыления на состав и свойства получаемых тонкоплёночных материалов, а также исследованию их коррозионной стойкости и термической стабильности. Описана методика получения автором мишеней для магнетронного распыления – методом горячего прессования из смеси элементарных порошков металлов, а также порошка высокоэнтропийного сплава. Описаны методы, применяемые автором для анализа образцов: рентгенофазовый анализ, сканирующая и просвечивающая электронная микроскопия, Оже-электронная спектроскопия, измерение электрических свойств.

**Третья глава** посвящена получению многокомпонентных мишеней (CoCrFeNiCu, Co-Cr-Fe-Ni-Ti), предназначенных для магнетронного распыления, и изучению влияния условий получения мишеней на их структуру и термическую стабильность.

**Четвертая глава** посвящена исследованию структуры и компонентного состава, а также изучению электрических свойств, термической стабильности и коррозионной стойкости плёнок CoCrFeNiCu, Co-Cr-Fe-Ni-Ti, полученных с помощью магнетронного распыления.

**Пятая глава** посвящена изготовлению резистивных структур на основе Co-Cr-Fe-Ni-Ti и изучению их структуры, компонентного состава, электрических свойств и термической стабильности.

Основные результаты формулируются в сжатом виде в качестве шести выводов. Все выводы диссертации хорошо обоснованы и не вызывают возражений.

#### **Научная новизна и достоверность защищаемых положений**

Научная новизна работы заключается в том, что впервые было проведено комплексное исследование, включающее в себя синтез и изучение структуры, термической стабильности и электрофизических свойств тонких плёнок высокоэнтропийных сплавов систем Co-Cr-Fe-Ni-Ti и Co-Cr-Fe-Ni-Cu. Показано, что такие плёнки обладают уникальным сочетанием электрофизических свойств. Установлено, что плёнки имеют аморфно-кристаллическую структуру и сохраняют свою структуру и свойства в широком температурном диапазоне от  $-196$  °C до  $530$  °C. Впервые изучены термоэлектрические свойства тонких плёнок на основе высокоэнтропийных сплавов. Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием современных экспериментальных методов,

воспроизводимостью результатов и согласием с данными, приведёнными в статьях, опубликованных в рецензируемых российских и международных научных журналах.

### **Практическая значимость работы**

Разработаны методы получения и оптимизации электрофизических свойств плёнок высокоэнтропийных сплавов. Результаты диссертационной работы могут быть использованы для создания новые тонкоплёночных резистивных элементов для микроэлектроники.

**К важнейшим результатам** диссертационной работы М.В. Полякова можно отнести:

- 1) Разработку нового способа получения плёнок высокоэнтропийных сплавов (подтверждено патентом РФ на изобретение).
- 2) Разработанные методы получения и оптимизации электрофизических свойств плёнок высокоэнтропийных сплавов Co-Cr-Fe-Ni-Ti, Co-Cr-Fe-Ni-Cu.
- 3) Выявленные закономерности влияния режимов магнетронного напыления на морфологию, структуру и химический состав плёнок высокоэнтропийных сплавов Co-Cr-Fe-Ni-Ti, Co-Cr-Fe-Ni-Cu.
- 4) Разработку на основе полученных плёнок резистивных структур с низкими удельным сопротивлением и ТКС в широком диапазоне температур (от  $-196$  до  $227$  °C), демонстрирующих перспективность использования таких плёнок в качестве резистивных элементов в микроэлектронике.

Каждый из этих результатов обладает несомненной **научной новизной и является практически значимым.**

К содержанию работы имеются следующие **вопросы и замечания:**

1. В п.1.4.1 (стр. 27) приводятся литературные данные об исследовании сплава CoCrFeNiCu, при этом полностью отсутствует информация о параметрах кристаллической решётки, что не даёт возможности в дальнейшем сравнить результаты, полученные автором диссертации (см. Таблицу 3.1), с литературными данными.

2. Кристаллическая структура занимает достаточно важное место в диссертационной работе, однако автор описывает структуру только в терминах – ОЦК, ГЦК, ГПУ. Термин "пространственная группа" в диссертации не встречается ни одного раза, хотя он является основным при описании кристаллической решётки. Также, далеко не всегда приводится информация о параметрах кристаллических решёток. Например, на стр. 73 приведено следующее высказывание: "После напыления на поверхности мишени снизилось содержание ГЦК фаз, увеличилось содержание сигма

фазы и  $\text{Ni}_3\text{Ti}$ , а также исчезли оксидные фазы". Так как автор до этого не описывал, какие именно соединения имеют ГЦК структуру, то понять что-либо из этой фразы невозможно. Резюмирую вышесказанное, было бы крайне желательно приводить информацию о пространственной группе и параметрах кристаллической решётки для упоминаемых в диссертации фаз, в том числе при анализе данных рентгеновской дифракции.

3. На стр. 95 написано: "На рис. 4.1 представлены рентгенограммы ВЭС тонких пленок  $\text{CoCrFeNiCu}$ , осажденных при различном времени и мощности напыления. **Вследствие малой толщины пленки на дифракционной картине наблюдался только 100%-ный пик**, причем для регистрации дифракции использовали асимметричную схему с углом наклона образца к первичному пучку  $3^\circ$ ". Это объяснение очень странное, так как толщины исследованных плёнок составляли вплоть до 1.6 мкм, что на самом деле более чем достаточно для проведения рентгеноструктурных исследований, причём с использованием стандартной "theta - 2 theta" геометрии. По этому поводу возникает несколько вопросов: 1) была ли сделана оценка размера кристаллитов в этих плёнках; 2) была ли проведена оценка величины микронапряжений?

4. В тексте диссертации встречаются неудачные выражения и опечатки, например, на стр.6 (Введение): "... исследования, посвященные структуре и свойствам тонких пленок этих сплавов, синтезированных методом магнетронного напыления, остаются недостаточно изученными", на стр.13: "По теме диссертации опубликовано 16 печатных работ, в том числе 4 статьи в реферируемых научных журналах, входящих в Перечень ВАК и **базами** данных Web of Science и Scopus".

Вышеуказанные замечания не оказывают влияния на общую положительную оценку диссертационной работы Полякова М.В. Высокий уровень диссертации подтверждается соответствующими публикациями диссертанта в научных журналах с высоким рейтингом, результаты прошли апробацию на всероссийских и международных конференциях. Автореферат полно отражает основное содержание диссертации и результаты проведенных исследований.

На основании анализа степени обоснованности и достоверности научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, а также научной новизны и практической значимости, считаю, что диссертация Полякова Максима Викторовича «Структура и свойства тонких пленок  $\text{CoCrFeNiTi}$ ,  $\text{CoCrFeNiCu}$ , синтезированных методом магнетронного напыления из многокомпонентных мишеней», соответствует требованиям п. 9 "Положения о порядке присуждения учёных степеней (Постановление

