

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Института
проблем технологии микроэлектроники и
особочистых материалов РАН (ИПТМ РАН)

член-корреспондент РАН

Д.В. Рошупкин

« 07 »

2025 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук на диссертационную работу Чирковой Валентины Владимировны на тему «Формирование нанокристаллической структуры в гетерогенных аморфных сплавах на основе кобальта, железа и алюминия», представляемой на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Актуальность темы диссертационной работы

Диссертационная работа Валентины Владимировны Чирковой посвящена исследованию условий формирования нанокристаллической структуры в гетерогенных аморфных сплавах. Такие сплавы относятся к группе новых материалов, имеющих композитную аморфно-нанокристаллическую структуру и характеризующихся высоким комплексом физико-химических свойств. Поскольку физические свойства материалов существенно зависят от их структуры, определение условий формирования структур с теми или иными структурными параметрами, а также поиск путей создания материалов с определенными структурными характеристиками, несомненно, **являются актуальными.**

Понимание процессов формирования аморфно-нанокристаллической структуры с определенным фазовым составом, размером структурных составляющих, их взаимной ориентации и локализации открывает пути создания новых материалов, перспективных для разработки приборов и устройств нового поколения.

Целью представленной работы было исследование механизмов формирования нанокристаллической структуры в аморфных сплавах с гетерогенной аморфной структурой, содержащей неоднородности химического состава и/или атомной плотности.

В соответствии с намеченной целью были поставлены следующие **задачи**:

- 1) Исследовать структуру, формирующуюся на начальных стадиях кристаллизации при термической обработке аморфных сплавов, легированных компонентами с разной кристаллической структурой, для определения влияния:
 - типа кристаллической решетки легирующего компонента;
 - размера элементарной ячейки легирующего компонента;
 - растворимости легирующего компонента в основном компоненте сплава.
- 2) Исследовать структуру, формирующуюся на начальных стадиях кристаллизации предварительно деформированных аморфных сплавов при последующей термической обработке, и определить ее зависимость от:
 - предварительной деформации в пределах аморфного состояния;
 - степени предварительной деформации;
 - наличия покрытия.

Структура и объем диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, благодарностей и списка литературы из 160 наименований. Объем диссертации составляет 139 страниц машинописного текста, содержит 55 рисунков и 1 таблицу.

Анализ содержания работы и основных положений, выносимых на защиту

Во введении проанализировано общее направление исследования. В этой части работы раскрыта актуальность и новизна; представлены цель и задачи

исследования; приведены основные положения, выносимые на защиту; указана научная и практическая значимость.

В первой главе приведен обзор литературы, посвященный основной тематике диссертационной работы. В ней описаны способы получения аморфных сплавов, модели структуры аморфной фазы и свойства аморфных сплавов; представлены изменения структуры аморфных сплавов, происходящие в пределах аморфного состояния при термической и деформационной обработках; описана кристаллизация аморфных сплавов разного химического состава при термообработке и деформации. На основе анализа литературных данных сформулированы цели и задачи диссертационной работы.

Во второй главе приведено описание изучаемых объектов, основных методов обработки, подготовки и исследования образцов. Объектами исследования являлись аморфные сплавы на основе кобальта, железа и алюминия, полученные в виде лент методом скоростной закалки расплава на быстровращающееся колесо.

Для определения состояния поверхности сплавов, оценки качества и толщины покрытия использовался метод сканирующей электронной микроскопии. Для контроля химического состава сплавов использовался метод рентгеноспектрального микроанализа. Для определения тепловых характеристик сплавов использовался метод дифференциальной сканирующей калориметрии. Исследование структуры аморфных и частично-кристаллических сплавов проводилось после каждого этапа обработки (получения, деформации, нанесения покрытия, термообработки) методами рентгеноструктурного анализа и просвечивающей электронной микроскопии.

В третьей главе представлены результаты исследования кристаллизации аморфных сплавов, содержащих неоднородности химического состава. Эта глава посвящена исследованию формирования нанокристаллической структуры в сплавах на основе кобальта, легированных компонентами с различным типом кристаллической решетки (Nb, Ti), размером элементарной ячейки (Mn), растворимостью в основном компоненте сплава (Ni).

В четвертой главе представлены результаты исследования кристаллизации аморфных сплавов, содержащих неоднородности атомной плотности. В ней приведены результаты исследования формирования нанокристаллической структуры при термической обработке предварительно деформированных аморфных сплавов на основе кобальта, железа и алюминия, в том числе и сплавов с покрытием.

Диссертацию завершают заключение, благодарности и список литературы.

На защиту автор выносит следующие научные положения.

Первое научное положение касается влияния легирующих компонентов с разным типом кристаллической решетки и реализации механизма образования нанокристаллов с зарождением на упорядоченных областях гетерогенной аморфной фазы, структурно-связанных с зарождающейся кристаллической фазой в аморфных сплавах на основе кобальта (система Co-Si-B): введение компонентов с ОЦК решеткой в аморфные сплавы на основе кобальта приводит к образованию нанокристаллов с ОЦК решеткой; параметры нанокристаллов зависят от концентрации легирующего компонента; наблюдаемые различия связаны с разным количеством потенциальных мест зарождения нанокристаллов; вероятность образования ОЦК нанокристаллов и их параметры зависят от размера элементарной ячейки легирующего компонента, его концентрации и растворимости в основном металлическом компоненте сплава.

Второе положение касается влияния предварительной деформации и покрытия на образование нанокристаллов при последующей термической обработке аморфных сплавов на основе кобальта, железа и алюминия, имеющих разные упругие характеристики. Предварительная деформация аморфных сплавов способствует образованию большей доли нанокристаллов по сравнению с недеформированными сплавами; увеличение степени деформации приводит к увеличению доли нанокристаллов; использование покрытия с большей энергией образования вакансий по сравнению с энергией образования вакансий в исследованных аморфных сплавах позволяет увеличить долю нанокристаллов. Влияние областей пониженной плотности на образование нанокристаллов

обусловлено ускорением диффузионного массопереноса в полосах сдвига деформированных аморфных сплавов.

Научную новизну диссертационной работы Чирковой Валентины Владимировны можно сформулировать следующим образом:

- на основе полученных экспериментальных данных впервые проанализирован механизм образования нанокристаллов в гетерогенной аморфной фазе, базирующийся на родстве ближнего порядка в упорядоченных областях гетерогенной аморфной фазы и структуры первичной фазы, образующейся на начальной стадии кристаллизации;
- установлено влияние структуры легирующих компонентов (Fe, Nb, Mn – ОЦК, Ti – ГПУ, Ni – ГЦК) на кристаллизацию аморфных сплавов на основе кобальта (система Co-Si-B); изучена возможность образования нанокристаллов с кристаллической решеткой, родственной решетке легирующего компонента;
- определена зависимость параметров формирующейся кристаллической структуры (фазовый состав, доля и размер нанокристаллов) от типа кристаллической решетки легирующего компонента;
- впервые исследовано влияние предварительной деформации на образование нанокристаллов при последующей термообработке и установлена зависимость доли формирующейся кристаллической фазы от степени деформации сплавов с разными упругими характеристиками (аморфные сплавы систем Co-Si-B-Fe-Nb, Al-Ni-Gd);
- определена роль покрытия (Ta) в процессах образования нанокристаллов в исходных и деформированных аморфных сплавах (аморфные сплавы систем Co-B-Fe-Nb, Fe-Si-B, Al-Ni-Gd).

Апробация результатов диссертационной работы и публикации

Основные результаты и положения диссертации докладывались и обсуждались на многочисленных научных конференциях. Личный вклад Автора в получении результатов настоящего исследования несомненен. По теме диссертации опубликовано 7 печатных работ, входящих в перечень

рецензируемых научных журналов, определенных ВАК, 7 тезисов в сборниках трудов конференций.

Соответствие диссертационной работы критериям, предъявляемым к диссертациям

Диссертационная работа Чирковой Валентины Владимировны на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научных задач, имеющих значение для развития направления исследований в области физики конденсированного состояния. В частности, результаты проведенного исследования расширяют существующие представления о принципах формирования нанокристаллической структуры в аморфных сплавах при различных внешних воздействиях, что дает возможность управлять формирующейся композитной аморфно-кристаллической структурой, и, как следствие, открывает пути создания новых материалов с высокими физико-химическими свойствами.

Представленная диссертация обладает внутренним единством, разделы и результаты исследования являются взаимосвязанными. Достоверность и обоснованность представленных результатов подтверждается использованием современного научного оборудования, признанных мировым научным сообществом методик исследования и диагностики материалов, а также публикациями полученных результатов в высокорейтинговых научных журналах. Результаты работы и выносимые на защиту научные положения обладают научной новизной, в достаточной степени аргументированы и обоснованы автором.

Как любая большая работа, диссертация В.В. Чирковой несвободна от недостатков. В качестве замечаний следует отметить следующее:

1. В Главе 3.2 рассматривается влияние размера элементарной ячейки легирующего компонента на образование нанокристаллов. Однако, поскольку количество атомов, приходящихся на элементарную ячейку, существенно различно, и составляет 2 и 58 атомов для Nb и Mn, соответственно, сделанный упор на ОЦК решетку обоих использовавшихся металлов Nb и Mn не вполне корректен.

2. На стр. 60 и стр. 109 говорится о полировке и ионной бомбардировке при приготовлении образцов для электронно-микроскопических исследований. При этом ничего не говорится о том, может ли вызванная таким образом деформация в образцах влиять на их конечную структуру.

3. На стр. 101-102 и рис. 4.12 Автор рассуждает о появившемся «плече» на рентгенограммах после отжига образцов. Для сравнения и корректного анализа следовало бы привести рентгенограммы этих образцов до отжига.

4. Диссертация не свободна от стилистических и смысловых недочетов. Например: «азотные ловушки для предотвращения перегрева образца». Также, некоторые моменты в Диссертации требуют более детального обсуждения. Так обозначения на рис. 1.9, 1.18, 4.1 объяснены не полностью. Присутствуют определенные недоговоренности или недостаточно подробно объяснено, например, каким образом на рисунках 4.6, 4.9, 4.12, 4.13, 4.19, 4.23 проведено разложение кривых на дифракционную и диффузную составляющие, а на стр. 104, каким образом получены значения размеров нанокристаллов и т.д.

В конечном итоге, отмеченные замечания не ставят под сомнение большой объем проделанной работы, не затрагивают основных результатов, не снижают значимость проведенного исследования и не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы, а носят, в основном, уточняющий характер. Диссертационная работа Чирковой Валентины Владимировны «Формирование нанокристаллической структуры в гетерогенных аморфных сплавах на основе кобальта, железа и алюминия» является законченным научным исследованием, выполненном Автором на высоком научном уровне. Положения, выносимые на защиту, представляют собой оригинальный научный результат, который является решением актуальной научной проблемы. Диссертационная работа «Формирование нанокристаллической структуры в гетерогенных аморфных сплавах на основе кобальта, железа и алюминия» полностью соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук согласно «Положению о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской

федерации от 24 сентября 2013 года № 842, а ее автор, Чиркова Валентина Владимировна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния».

Автореферат полностью отражает содержание представленной диссертации.

Доклад по материалам диссертации был представлен и получил положительную оценку на научном семинаре «Материаловедение и Технология» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов Российской академии наук от 26 июня 2025 г., протокол № 5.

Отзыв составил:

Ведущий научный сотрудник лаборатории
физики полупроводниковых наноструктур
доктор физико-математических наук
по специальности 2.2.2 – «Электронная компонентная база
микро- и наноэлектроники, квантовых устройств»

Тел.: +7 (49652) 44238

Эл. почта: malikov@iptm.ru

Подпись И.В. Маликова заверяю

Ученый секретарь ИПТМ РАН

кандидат физико-математических наук



И.В. Маликов



О.В. Феклисова

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

Адрес: 142432, г. Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д. 6.

Тел. +7 (49652) 44060; телефакс: +7 (49652) 44225.

Эл. почта: general@iptm.ru