

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОЛГОГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСиС»

**Л. В. Кожитов, И. В. Запороцкова, Д. Г. Муратов,
А. В. Попкова, В. Г. Косушкин, Н. П. Борознина**

**ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ
СИНТЕЗА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ
СПЛАВОВ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
НА ОСНОВЕ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

*Под научной редакцией доктора физико-математических наук,
профессора И. В. Запороцковой*

Волгоград 2018

УДК 53:620(075.8)

ББК 22.37я73

Ф48

Рекомендовано к опубликованию ученым советом
института приоритетных технологий
(протокол № 10 от 27.11 2018 г.)

Рецензенты:

д-р физ.-мат. наук, проф., почетный работник высшей школы,
директор Регионального центра нанотехнологий ЮЗГУ *А. П. Кузьменко*;
д-р техн. наук, проф. кафедры судебной экспертизы
и физического материаловедения ВолГУ *В. В. Яцьишен*

Физические методы синтеза металлических наночастиц сплавов
и композиционных материалов на основе переходных металлов [Текст] :
Ф48 учеб. пособие / Л. В. Кожитов, И. В. Запороцкова, Д. Г. Муратов,
А. В. Попкова, В. Г. Косушкин, Н. П. Борознина ; под науч. ред.
д-ра физ.-мат. наук, проф. И. В. Запороцковой ; Федер. гос. авт. обра-
зоват. учреждение высш. образования «Волгогр. гос. ун-т» ; Нац. исслед.
технол. ун-т «МИСиС». – Волгоград : Изд-во ВолГУ, 2018. – 337 с.

ISBN 978-5-9669-1853-8

В учебном пособии рассмотрены классификация наноструктур и методов получения наночастиц переходных металлов и их сплавов, применение наноматериалов, физические методы синтеза наночастиц и наноматериалов. При исследовании физических методов синтеза наночастиц переходных металлов и их сплавов в издании представлено аппаратное оформление процессов; оценены основные факторы, влияющие на образование, рост и свойства синтезируемых наночастиц; показана возможность управления структурой, морфологией и свойствами наночастиц и наноматериалов; анализируется технология синтеза металлоуглеродных нанокомпозитов FeCo/C, разработанная совместно ИНХС РАН и НИТУ «МИСиС». Подробно рассмотрен программный пакет COMSOL Multiphysics, используемый для расчета технологических параметров синтеза наночастиц и наноматериалов физическими методами.

Учебное пособие предназначено для студентов вузов, обучающихся по укрупненным направлениям подготовки 28.00.00 «Нанотехнологии и наноматериалы», 11.00.00 «Электроника и нанoeлектроника», профиль «Материалы и технологии магнитoeлектронники», уровней бакалавриата и магистратуры.

С/инв.

отдел в Учреждении УДК 53:620(075.8)
Научном центре РАН ББК 22.37я73
в Честноголовке

ISBN 978-5-9669-1853-8



- © Кожитов Л. В., Запороцкова И. В., Муратов Д. Г., Попкова А. В., Косушкин В. Г., Борознина Н. П., 2018
- © ФГАОУ ВО «Волгоградский государственный университет», 2018
- © Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», 2018
- © Оформление. Издательство Волгоградского государственного университета, 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	6
Глава 1. ВВЕДЕНИЕ В МИР НАНОМАТЕРИАЛОВ	10
1.1. Основные термины и понятия наномира	10
1.2. Классификация наноструктур.....	16
1.3. Классификация методов получения наночастиц и наноматериалов	22
1.4. Магнитные свойства наночастиц переходных металлов и их сплавов.....	27
1.5. Применение наноматериалов	41
<i>Контрольные вопросы к главе 1</i>	53
<i>Список литературы к главе 1</i>	55
Глава 2. ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ СИНТЕЗА НАНОЧАСТИЦ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ	56
2.1. Термическое вакуумное испарение	56
2.2. Испарение – конденсация	66
2.3. Лазерная абляция.....	74
2.4. Молекулярно-лучевая эпитаксия.....	80
2.5. Диодные и триодные системы распыления	87
2.6. Плазмохимический синтез.....	99
2.7. Механосинтез	114
2.8. Электродуговой метод	130
2.9. Пиролиз.....	138
2.10. Интенсивная пластическая деформация	149
2.11. Кристаллизация аморфных сплавов.....	158
2.12. Электропрядение	171
2.13. Детонационный синтез	178
2.14. Электрический взрыв проводников (ЭВП).....	182
2.15. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез.....	184
2.16. Электроэрозия	185
<i>Контрольные вопросы к главе 2</i>	186
<i>Список основной литературы к главе 2</i>	190
<i>Список дополнительной литературы к главе 2</i>	192
Глава 3. СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ СПЛАВОВ МЕТАЛЛОВ ГРУППЫ ЖЕЛЕЗА В УГЛЕРОДНОЙ МАТРИЦЕ НАНОКОМПОЗИТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИК-НАГРЕВА	194

3.1.	Методика синтеза нанокompозитов FeCo/C на основе полиакрилонитрила под действием ИК-нагрева	194
3.2.	Термические превращения полиакрилонитрила	200
3.3.	Основные понятия кинетики твердофазных реакций	208
3.4.	Аппаратура и методы изучения кинетических закономерностей твердофазных реакций.....	222
3.4.1.	Термогравиметрический анализ	223
3.4.2.	Дифференциальная сканирующая калориметрия	225
3.5.	Кинетика и термодинамика процесса синтеза нанокompозитов на основе полиакрилонитрила и солей металлов	227
3.5.1.	Методики исследования химических превращений в прекурсорах нанокompозитов	227
3.5.2.	Применение ТГА и ДСК для анализа химических превращений в прекурсорах нанокompозитов	230
3.6.	Изучение структуры и фазового состава нанокompозитов методом рентгеновской порошковой дифракции.....	249
3.6.1.	Основные принципы и возможности метода исследования	249
3.6.2.	Влияние условий процесса синтеза на фазовый состав нанокompозитов FeCo/C	257
3.7.	Изучение морфологии и химического состава нанокompозитов	262
3.7.1.	Методы электронной микроскопии и их возможности	262
3.7.2.	Сканирующая электронная микроскопия и анализ состава нанокompозитов FeCo/C	266
3.7.3.	Изучение морфологии и распределения металлических наночастиц в нанокompозитах FeCo/C методом просвечивающей электронной микроскопии	270
	<i>Контрольные вопросы к главе 3</i>	275
	<i>Список основной литературы к главе 3</i>	276
	<i>Список дополнительной литературы к главе 3</i>	277

Глава 4. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ТЕХНОЛОГИИ

ПОЛУЧЕНИЯ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

4.1.	Общие сведения о компьютерном моделировании при разработке технологии производства наноматериалов с использованием физических методов	279
------	---	-----

4.2.	Метод конечных элементов	281
4.3.	Метод конечных разностей.....	283
4.4.	Сравнение метода конечных элементов (МКЭ) и метода конечных разностей (МКР)	284
4.5.	Компьютерное мультифизическое моделирование природных и технических процессов.....	285
4.6.	Дифференциальные уравнения в частных производных, используемые в системе COMSOL Multiphysics	287
4.7.	Общие принципы создания моделей в COMSOL.....	289
4.7.1.	Главное меню.....	289
4.7.2.	Рабочая область и задание геометрии	292
4.7.3.	Функции, константы и выражения	297
4.7.4.	Задание граничных условий и изменение дифференциальных уравнений	301
4.7.5.	Построение сетки	303
4.7.6.	Решающее устройство.....	306
4.7.7.	Визуализация результатов	309
4.8.	Пример математического моделирования с помощью программного обеспечения COMSOL Multiphysics импульсного нагрева тонкой пленки.....	319
4.9.	Пример решения задачи теплопроводности с использованием системы COMSOL. Раздел «Heat Transfer» («Теплоперенос») системы COMSOL Multiphysics.....	319
4.9.1.	1D. Стационарный режим	319
4.9.2.	1D axial symmetry (Стационарный режим)	321
4.9.3.	1D axial symmetry (Нестационарный режим).....	325
4.10.	Практические задания.....	329
4.10.1.	Задание 1. Создание двумерной модели трубы с теплоизолирующим покрытием	329
4.10.2.	Задание 2. Теплообмен пластины	330
	<i>Заключение по главе 4</i>	330
	<i>Словарик терминов, используемых в панелях навигации COMSOL</i>	331
	<i>Математические термины, встречающиеся в тексте</i>	331
	<i>Контрольные вопросы к главе 4</i>	335
	<i>Список основной литературы к главе 4</i>	336
	<i>Список дополнительной литературы к главе 4</i>	336