

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

С. И. ГАРМАШОВ

**МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ
КРИСТАЛЛИЗАЦИИ**

Учебное пособие

Ростов-на-Дону – Таганрог
Издательство Южного федерального университета
2019

УДК 548.5
ББК 22.37
Г20

*Выпускается в соответствии с решением кафедры технической физики
Южного федерального университета (протокол № 5 от 27 марта 2019 г.)*

Рецензенты:

доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Физика» Ростовского
государственного университета путей сообщения *В. А. Явна*;

доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики
Южного федерального университета *В. С. Малышевский*

Гармашов, С. И.

Г20 Методы исследования процессов кристаллизации [Электронный ресурс] :
учебное пособие / С. И. Гармашов ; Южный федеральный университет. –
Ростов-на-Дону ; Таганрог : Издательство Южного федерального университе-
та, 2019. – Текстовое (символьное) электронное издание (6,62 Мб). – 1 электрон.
опт. диск (CDR). – Системные требования: процессор с тактовой частотой 1,5 ГГц
и выше, 1 Гб оперативной памяти, Windows 7 SP1, Windows 8, 8.1, Windows 10
(32- и 64-разрядные версии), Acrobat Reader DC, привод DVD-ROM.

ISBN 978-5-9275-3217-9

Содержит систематическое изложение материала по изучению физики процессов кристаллиза-
ции, который может быть использован при преподавании дисциплины «Экспериментальные методы
исследования» для студентов направления 16.03.01 – Техническая физика, а также при выполнении
ими научно-исследовательской работы. В пособии рассмотрены теоретические основы зарождения
твёрдой (кристаллической) фазы, на базе которых детально изложены механизм и особенности реа-
лизации некоторых методов кристаллизации веществ – в частности, метода термомиграции жидких
включений в кристалле под действием градиента температуры и метода квазизамкнутого объема для
получения тонких пленок разлагающихся соединений. В пособие включены вопросы и задачи для
контроля освоения студентами изложенного материала. Рекомендуются для студентов и аспирантов
технических направлений подготовки.

ISBN 978-5-9275-3217-9

УДК 548.5
ББК 22.37

© Южный федеральный университет, 2019
© Гармашов С. И., 2019
© Оформление. Макет. Издательство
Южного федерального университета, 2019

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА 1. РАВНОВЕСИЕ ФАЗ. ПЛОСКАЯ ГРАНИЦА РАЗДЕЛА ФАЗ	7
1.1. Однокомпонентные системы	7
1.2. Многокомпонентные системы	9
ГЛАВА 2. РАВНОВЕСИЕ ФАЗ В СЛУЧАЕ ИСКРИВЛЕННОЙ МЕЖФАЗНОЙ ГРАНИЦЫ	11
2.1. Понятие поверхностной энергии.....	11
2.2. Учет анизотропии удельной межфазной энергии. Формула Херринга.....	12
2.3. Равновесная форма кристалла.....	14
ГЛАВА 3. КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ	17
3.1. Образование зародышей кристаллизации	17
3.2. Механизм двумерного зародышеобразования	18
3.3. Нормальный механизм	19
3.4. Механизм роста на винтовых дислокациях.....	20
3.5. Скорость роста при различных механизмах	21
ГЛАВА 4. ТЕРМОМИГРАЦИЯ. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЯВЛЕНИЯ	22
4.1. Механизм процесса миграции (плоские прослойки)	22
4.2. Форма и скорость цилиндрических включений (методика расчета)	29
4.2.1. Равновесная форма включения.....	30
4.2.2 Неравновесная форма включения	32
4.3. Определение параметров межфазных процессов из движения цилиндрических включений.....	37
4.4. Методика определения степени анизотропии межфазной энергии	39

ГЛАВА 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ТЕРМОМИГРАЦИИ	41
5.1. Общие сведения	41
5.2. Образец	42
5.3. Нагревательная система	43
5.4. Вакуумная установка	44
5.5. Измерение вакуума	46
5.6. Измерение температуры с помощью термопары	49
5.7. Измерение температуры с помощью пирометра	50
5.8. Основы работы с пирометром ЛОП-72	51
5.9. Обработка образца по окончании эксперимента	53
5.10. Задания по обработке формы сечения мигрировавшего включения	55
Контрольные вопросы к главам 1–5	57
ГЛАВА 6. ОСАЖДЕНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК В ВАКУУМЕ...	59
6.1. Термическое испарение как метод получения пленок	59
6.2. Вакуум в тонкопленочной технологии	60
6.3. Гетерогенное образование зародышей	63
6.4. Режимы роста тонких пленок.....	65
6.5. Испарители с резистивным нагревом	66
ГЛАВА 7. ОСОБЕННОСТИ ИСПАРЕНИЯ СОЕДИНЕНИЙ	69
7.1. Общие замечания	69
7.2. Специальные методы испарения соединений	71
7.2.1. Метод дискретного (взрывного) испарения.....	71
7.2.2. Метод импульсного лазерного осаждения пленок	72
7.2.3. Метод квазизамкнутого объема.....	73
ГЛАВА 8. ПОЛУЧЕНИЕ ПЛЕНОК СУЛЬФОИОДИДА СУРЬМЫ МЕТОДОМ КВАЗИЗАМКНУТОГО ОБЪЕМА.....	75
8.1. Вакуумная установка	75
8.2. Вещество-источник	76
8.3. Подложка	76

8.4. Испарительная система	77
8.5. Контроль температурного режима	78
8.6. Анализ полученных пленок	80
8.7. Задания на проведение эксперимента по получению пленок SbSI	80
Контрольные вопросы к главам 6–8	82
Литература	84