

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:

ФИО: Исаев Игорь Магомедович

Должность: Проректор по безопасности и общим вопросам

Дата подписания: 30.08.2023 16:41:18

Уникальный программный ключ:

d7a26b9e8ca85e98ac3de2ab454b4659d961f749

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования

«Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

## Рабочая программа дисциплины (модуля)

# Физика поверхностей раздела в твердых телах

Закреплена за подразделением

Кафедра физической химии

Направление подготовки

03.04.02 ФИЗИКА

Профиль

Физика конденсированного состояния

Квалификация

**Магистр**

Форма обучения

**очная**

Общая трудоемкость

**4 ЗЕТ**

Часов по учебному плану

144

Формы контроля в семестрах:

в том числе:

зачет 1

аудиторные занятия

51

самостоятельная работа

93

### Распределение часов дисциплины по семестрам

| Семестр<br>(<Курс>.<Семестр на<br>курсе>) | 1 (1.1) |     | Итого |     |
|---|---------|-----|-------|-----|
|   | УП      | РП  | УП    | РП  |
| Неделя                                    | 18      |     |       |     |
| Вид занятий                               | УП      | РП  | УП    | РП  |
| Лекции                                    | 17      | 17  | 17    | 17  |
| Лабораторные                              | 34      | 34  | 34    | 34  |
| Итого ауд.                                | 51      | 51  | 51    | 51  |
| Контактная работа                         | 51      | 51  | 51    | 51  |
| Сам. работа                               | 93      | 93  | 93    | 93  |
| Итого                                     | 144     | 144 | 144   | 144 |

Программу составил(и):

*д.ф.-м.н., проф., Бокштейн Борис Самуилович; к.т.н., доц., Похвиснев Юрий Валентинович*

Рабочая программа

**Физика поверхностей раздела в твердых телах**

Разработана в соответствии с ОС ВО:

Самостоятельно устанавливаемый образовательный стандарт высшего образования - магистратура Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» по направлению подготовки 03.04.02 ФИЗИКА (приказ от 02.04.2021 г. № 119 о.в.)

Составлена на основании учебного плана:

03.04.02 ФИЗИКА, 03.04.02-МФ3-22-1.plx Физика конденсированного состояния, утвержденного Ученым советом ФГАОУ ВО НИТУ "МИСиС" в составе соответствующей ОПОП ВО 22.09.2022, протокол № 8-22

Утверждена в составе ОПОП ВО:

03.04.02 ФИЗИКА, Физика конденсированного состояния, утвержденной Ученым советом ФГАОУ ВО НИТУ "МИСиС" 22.09.2022, протокол № 8-22

Рабочая программа одобрена на заседании

**Кафедра физической химии**

Протокол от 22.06.2021 г., №11-20/21

Руководитель подразделения Салимон А.И.

**1. ЦЕЛИ ОСВОЕНИЯ**

|     |   |
|-----|---|
| 1.1 | Целью освоения дисциплины «Физика поверхностей раздела в твердых телах» является подготовка выпускников, способных применять полученные компетенции при решении проблем, возникающих в их профессиональной деятельности |
| 1.2 | Задачи: научить решению задач разработки новых и совершенствования существующих материалов за счет управления кристаллической структурой и свойствами поверхностей раздела  |

**2. МЕСТО В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ**

|          |  |      |
|----------|--|------|
| Блок ОП: |  | Б1.О |
| 2.1      | Требования к предварительной подготовке обучающегося:  |      |
| 2.2      | Дисциплины (модули) и практики, для которых освоение данной дисциплины (модуля) необходимо как предшествующее:                             |      |
| 2.2.1    | Производственная практика по получению профессиональных умений и опыта профессиональной деятельности.<br>Научно-исследовательская практика |      |
| 2.2.2    | История и методология физики   |      |
| 2.2.3    | Современные проблемы физики  |      |
| 2.2.4    | Преддипломная практика для выполнения выпускной квалификационной работы  |      |
| 2.2.5    | Подготовка к процедуре защиты и защита выпускной квалификационной работы   |      |

**3. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫЕ С ФОРМИРУЕМЫМИ КОМПЕТЕНЦИЯМИ**

|   |  |
|---|--|
| <b>ПК-3: Способен проводить математические расчеты в рамках классических или разрабатываемых новых физических моделей процессов в области физики конденсированного состояния</b>  |  |
| <b>Знать:</b>   |  |
| ПК-3-31 методы расчета характеристик процессов массопереноса  |  |
| <b>УК-2: Способен интегрировать знания и принимать решения в сложных ситуациях, формулировать суждения на основе неполной или ограниченной информации, управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла</b>   |  |
| <b>Знать:</b>   |  |
| УК-2-31 условия эволюции и равновесия   |  |
| <b>УК-1: Способен осуществлять критический анализ новых и сложных инженерных объектов, процессов и систем в междисциплинарном контексте, проблемных ситуаций на основе системного подхода, выбрать и применить наиболее подходящие и актуальные методы из существующих аналитических, вычислительных и экспериментальных методов или новых и инновационных методов, выработать стратегию действий</b> |  |
| <b>Знать:</b>   |  |
| УК-1-31 методы термодинамического и кинетического анализа процессов на поверхностях раздела   |  |
| <b>ПК-3: Способен проводить математические расчеты в рамках классических или разрабатываемых новых физических моделей процессов в области физики конденсированного состояния</b>  |  |
| <b>Уметь:</b>   |  |
| ПК-3-У1 осуществлять расчеты направления и скорости процессов и равновесия в системах, содержащих поверхности раздела, с использованием справочных данных   |  |
| <b>УК-2: Способен интегрировать знания и принимать решения в сложных ситуациях, формулировать суждения на основе неполной или ограниченной информации, управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла</b>   |  |
| <b>Уметь:</b>   |  |
| УК-2-У1 использовать основные законы и понятия физики поверхностных явлений для анализа процессов на поверхностях раздела   |  |
| <b>УК-1: Способен осуществлять критический анализ новых и сложных инженерных объектов, процессов и систем в междисциплинарном контексте, проблемных ситуаций на основе системного подхода, выбрать и применить наиболее подходящие и актуальные методы из существующих аналитических, вычислительных и экспериментальных методов или новых и инновационных методов, выработать стратегию действий</b> |  |
| <b>Уметь:</b>   |  |
| УК-1-У1 составлять термодинамические и кинетические модели и описывать условия эволюции и равновесия этих процессов   |  |
| <b>ПК-3: Способен проводить математические расчеты в рамках классических или разрабатываемых новых физических моделей процессов в области физики конденсированного состояния</b>  |  |

|   |
|---|
| <b>Владеть:</b>   |
| ПК-3-В1 навыками проведения измерений характеристик процессов на поверхностях раздела с использованием классических и современных методов физико-химического анализа, в том числе, компьютерных программ  |
| <b>УК-2: Способен интегрировать знания и принимать решения в сложных ситуациях, формулировать суждения на основе неполной или ограниченной информации, управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла</b>   |
| <b>Владеть:</b>   |
| УК-2-В1 навыками решения теоретических и практических задач, связанных с профессиональной деятельностью   |
| <b>УК-1: Способен осуществлять критический анализ новых и сложных инженерных объектов, процессов и систем в междисциплинарном контексте, проблемных ситуаций на основе системного подхода, выбрать и применить наиболее подходящие и актуальные методы из существующих аналитических, вычислительных и экспериментальных методов или новых и инновационных методов, вырабатывать стратегию действий</b> |
| <b>Владеть:</b>   |
| УК-1-В1 навыками самостоятельной работы с литературой для поиска информации об отдельных определениях, понятиях и терминах  |

#### 4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ

| Код занятия | Наименование разделов и тем /вид занятия/              | Семестр / Курс | Часов | Формируемые индикаторы компетенций  | Литература и эл. ресурсы                    | Примечание | КМ | Выполняемые работы |
|-------------|--|----------------|-------|---|---|------------|----|--------------------|
|             | <b>Раздел 1. Виды поверхностей раздела</b>             |                |       |   |   |            |    |                    |
| 1.1         | Виды поверхностей раздела /Лек/                        | 1              | 2     | УК-1-31 УК-2-31 ПК-3-В1<br>УК-2-У1 УК-2-В1 УК-1-У1<br>УК-1-В1 ПК-3-31 ПК-3-У1 | Л1.1 Л1.2<br>Л1.3Л2.1Л3.1<br>Э1 Э2 Э3 Э4 Э5 |            |    |                    |
| 1.2         | Выполнение индивидуального задания /Ср/                | 1              | 10    | УК-2-31 УК-2-В1 УК-2-У1<br>УК-1-31 УК-1-У1 УК-1-В1<br>ПК-3-31 ПК-3-У1         | Л1.1 Л1.2<br>Л1.3Л2.1Л3.1<br>Э1 Э2 Э3 Э4 Э5 |            |    | Р1                 |
| 1.3         | Компьютерное моделирование поверхностных явлений /Лаб/ | 1              | 4     | ПК-3-У1 ПК-3-В1 УК-2-31<br>УК-2-У1 УК-2-В1 УК-1-31<br>УК-1-У1 УК-1-В1 ПК-3-31 | Л1.1 Л1.2<br>Л1.3Л2.1Л3.1<br>Э1 Э2 Э3 Э4 Э5 |            |    |                    |
|             | <b>Раздел 2. Термодинамика поверхностных явлений</b>   |                |       |   |   |            |    |                    |
| 2.1         | Метод избытков Гиббса /Лек/                            | 1              | 2     | УК-1-31 УК-2-31 ПК-3-У1<br>УК-2-У1 УК-2-В1 УК-1-У1<br>УК-1-В1 ПК-3-31         | Л1.1 Л1.2<br>Л1.3Л2.1Л3.1<br>Э1 Э2 Э3 Э4    |            |    |                    |
| 2.2         | Выполнение индивидуального задания /Ср/                | 1              | 10    | ПК-3-31 ПК-3-В1 УК-2-31<br>УК-2-У1 УК-2-В1 УК-1-31<br>УК-1-У1 УК-1-В1 ПК-3-У1 | Л1.1 Л1.2<br>Л1.3Л2.1Л3.1<br>Э1 Э2 Э3 Э4    |            |    |                    |
| 2.3         | Компьютерное моделирование адсорбционных явлений /Лаб/ | 1              | 4     | УК-1-31 УК-2-У1 ПК-3-В1<br>УК-2-31 УК-2-В1 УК-1-У1<br>УК-1-В1 ПК-3-31 ПК-3-У1 | Л1.1 Л1.2<br>Л1.3Л2.1Л3.1<br>Э1 Э2 Э3 Э4    |            |    |                    |

|   |   |   |    |   |  |  |     |    |
|---|---|---|----|---|--|--|-----|----|
| 2.4                                       | Изотермы адсорбции и поверхностного натяжения /Лек/         | 1 | 2  | УК-2-31 УК-2-У1 УК-2-В1<br>УК-1-31 УК-1-У1 УК-1-В1<br>ПК-3-31 ПК-3-У1         | Л1.1 Л1.2<br>Л1.3Л2.1Л3.<br>1<br>Э1 Э2 Э3 Э4 |  |     |    |
| 2.5                                       | Выполнение индивидуального задания /Ср/                     | 1 | 10 | ПК-3-31 ПК-3-У1 УК-2-31<br>УК-2-У1 УК-2-В1 УК-1-31<br>УК-1-У1 УК-1-В1         | Л1.1 Л1.2<br>Л1.3Л2.1Л3.<br>1<br>Э1 Э2 Э3 Э4 |  |     | Р2 |
| 2.6                                       | Компьютерное моделирование адсорбционных явлений /Лаб/      | 1 | 4  | УК-1-31 УК-2-У1 УК-2-31<br>УК-2-В1 УК-1-У1 УК-1-В1<br>ПК-3-31 ПК-3-У1         | Л1.1 Л1.2<br>Л1.3Л2.1Л3.<br>1<br>Э1 Э2 Э3 Э4 |  |     |    |
| 2.7                                       | Методы измерения адсорбции и поверхностного натяжения /Лек/ | 1 | 1  | УК-2-31 УК-2-У1 УК-2-В1<br>УК-1-31 УК-1-У1 УК-1-В1<br>ПК-3-31 ПК-3-У1         | Л1.1 Л1.2<br>Л1.3Л2.1Л3.<br>1<br>Э1 Э2 Э3 Э4 |  |     |    |
| 2.8                                       | Выполнение индивидуального задания /Ср/                     | 1 | 10 | УК-1-У1 УК-1-В1 ПК-3-У1<br>УК-2-31 УК-2-У1 УК-2-В1<br>УК-1-31 ПК-3-31         | Л1.1 Л1.2<br>Л1.3Л2.1Л3.<br>1<br>Э1 Э2 Э3 Э4 |  |     |    |
| 2.9                                       | Компьютерное моделирование адсорбционных явлений /Лаб/      | 1 | 4  | УК-1-31 УК-1-У1 ПК-3-У1<br>УК-2-31 УК-2-У1 УК-2-В1<br>УК-1-В1 ПК-3-31         | Л1.1 Л1.2<br>Л1.3Л2.1Л3.<br>1<br>Э1 Э2 Э3 Э4 |  | КМ1 |    |
| <b>Раздел 3. Диффузия в твердых телах</b> |   |   |    |   |  |  |     |    |
| 3.1                                       | Уравнения диффузии /Лек/                                    | 1 | 1  | УК-2-31 УК-2-В1 УК-2-У1<br>УК-1-31 УК-1-У1 УК-1-В1<br>ПК-3-31 ПК-3-У1         | Л1.1 Л1.2<br>Л1.3Л2.1Л3.<br>1<br>Э4 Э5       |  |     |    |
| 3.2                                       | Выполнение индивидуального задания /Ср/                     | 1 | 8  | УК-1-У1 УК-1-В1 УК-2-31<br>УК-2-У1 УК-2-В1 УК-1-31<br>ПК-3-31 ПК-3-У1         | Л1.1 Л1.2<br>Л1.3Л2.1Л3.<br>1<br>Э4 Э5       |  |     |    |
| 3.3                                       | Компьютерное моделирование объемной диффузии /Лаб/          | 1 | 4  | ПК-3-У1 ПК-3-В1 УК-2-31<br>УК-2-У1 УК-2-В1 УК-1-31<br>УК-1-У1 УК-1-В1 ПК-3-31 | Л1.1 Л1.2<br>Л1.3Л2.1Л3.<br>1<br>Э4 Э5       |  |     |    |
| 3.4                                       | Случайные блуждания. Вакансионный механизм /Лек/            | 1 | 1  | УК-2-У1 УК-2-В1 УК-2-31<br>УК-1-31 УК-1-У1 УК-1-В1<br>ПК-3-31 ПК-3-У1         | Л1.1 Л1.2<br>Л1.3Л2.1Л3.<br>1<br>Э4 Э5       |  |     |    |

|     |   |   |   |   |                                 |  |  |    |
|-----|---|---|---|---|---------------------------------|--|--|----|
| 3.5 | Выполнение индивидуального задания /Ср/                         | 1 | 8 | ПК-3-У1 ПК-3-В1 УК-2-31 УК-2-У1 УК-2-В1 УК-1-31 УК-1-У1 УК-1-В1 ПК-3-31 | Л1.1 Л1.2 Л1.3Л2.1Л3.1 Э4 Э5    |  |  |    |
| 3.6 | Компьютерное моделирование объемной диффузии /Лаб/              | 1 | 2 | УК-2-У1 УК-2-В1 УК-2-31 УК-1-31 УК-1-У1 УК-1-В1 ПК-3-31 ПК-3-У1         | Л1.1 Л1.2 Л1.3Л2.1Л3.1 Э4 Э5    |  |  |    |
| 3.7 | Методы определения коэффициента диффузии /Лек/                  | 1 | 1 | УК-2-31 УК-2-У1 УК-2-В1 УК-1-31 УК-1-У1 УК-1-В1 ПК-3-31 ПК-3-У1         | Л1.1 Л1.2 Л1.3Л2.1Л3.1 Э4 Э5    |  |  |    |
| 3.8 | Выполнение индивидуального задания /Ср/                         | 1 | 7 | УК-1-31 УК-2-В1 УК-2-31 УК-2-У1 УК-1-У1 УК-1-В1 ПК-3-31 ПК-3-У1         | Л1.1 Л1.2 Л1.3Л2.1Л3.1 Э4 Э5    |  |  |    |
| 3.9 | Компьютерное моделирование зернограничной диффузии /Лаб/        | 1 | 2 | УК-1-31 УК-2-У1 УК-2-31 УК-2-В1 УК-1-У1 УК-1-В1 ПК-3-31 ПК-3-У1         | Л1.1 Л1.2 Л1.3Л2.1Л3.1 Э4 Э5    |  |  |    |
|     | <b>Раздел 4. Диффузия по границам зерен</b>                     |   |   |   |                                 |  |  |    |
| 4.1 | Диффузия в границах зерен /Лек/                                 | 1 | 1 | УК-2-31 УК-2-У1 УК-2-В1 УК-1-31 УК-1-У1 УК-1-В1 ПК-3-31 ПК-3-У1         | Л1.1 Л1.2 Л1.3Л2.1Л3.1 Э1 Э2 Э3 |  |  |    |
| 4.2 | Выполнение индивидуального задания /Ср/                         | 1 | 6 | УК-1-У1 УК-1-В1 УК-2-31 УК-2-У1 УК-2-В1 УК-1-31 ПК-3-31 ПК-3-У1         | Л1.1 Л1.2 Л1.3Л2.1Л3.1 Э1 Э2 Э3 |  |  | Р3 |
| 4.3 | Методы определения коэффициента диффузии в границах зерен /Лек/ | 1 | 1 | УК-2-31 УК-2-У1 УК-2-В1 УК-1-31 УК-1-У1 УК-1-В1 ПК-3-31 ПК-3-У1         | Л1.1 Л1.2 Л1.3Л2.1Л3.1 Э1 Э2 Э3 |  |  |    |
| 4.4 | Компьютерное моделирование зернограничной диффузии /Лаб/        | 1 | 2 | УК-1-31 УК-2-В1 УК-2-31 УК-2-У1 УК-1-У1 УК-1-В1 ПК-3-31 ПК-3-У1         | Л1.1 Л1.2 Л1.3Л2.1Л3.1 Э1 Э2 Э3 |  |  |    |
| 4.5 | Зернограничная сегрегация и зернограничная диффузия /Лек/       | 1 | 1 | УК-2-У1 УК-2-В1 УК-2-31 УК-1-31 УК-1-У1 УК-1-В1 ПК-3-31 ПК-3-У1         | Л1.1 Л1.2 Л1.3Л2.1Л3.1 Э1 Э2 Э3 |  |  |    |

|   |  |   |   |   |                                       |  |  |  |
|---|--|---|---|---|---------------------------------------|--|--|--|
| 4.6   | Компьютерное моделирование зернограничной диффузии /Лаб/   | 1 | 2 | УК-1-31 УК-2-В1 УК-2-31 УК-2-У1 УК-1-У1 УК-1-В1 ПК-3-31 ПК-3-У1 | Л1.1 Л1.2 Л1.3Л2.1Л3.1<br>Э1 Э2 Э3    |  |  |  |
| 4.7   | Выполнение индивидуального задания /Ср/                    | 1 | 6 | УК-1-31 УК-2-В1 УК-2-31 УК-2-У1 УК-1-У1 УК-1-В1 ПК-3-31 ПК-3-У1 | Л1.1 Л1.2 Л1.3Л2.1Л3.1<br>Э1 Э2 Э3    |  |  |  |
| <b>Раздел 5. Процессы на поверхностях раздела</b> |  |   |   |   |                                       |  |  |  |
| 5.1   | Диффузионный рост /Лек/                                    | 1 | 1 | УК-2-31 УК-2-В1 УК-2-У1 УК-1-31 УК-1-У1 УК-1-В1 ПК-3-31 ПК-3-У1 | Л1.1 Л1.2 Л1.3Л2.1Л3.1<br>Э1 Э2 Э3 Э5 |  |  |  |
| 5.2   | Выполнение индивидуального задания /Ср/                    | 1 | 6 | УК-1-31 УК-2-В1 УК-2-31 УК-2-У1 УК-1-У1 УК-1-В1 ПК-3-31 ПК-3-У1 | Л1.1 Л1.2 Л1.3Л2.1Л3.1<br>Э1 Э2 Э3    |  |  |  |
| 5.3   | Компьютерное моделирование зернограничной диффузии /Лаб/   | 1 | 2 | УК-1-В1 ПК-3-31 УК-2-31 УК-2-У1 УК-2-В1 УК-1-31 УК-1-У1 ПК-3-У1 | Л1.1 Л1.2 Л1.3Л2.1Л3.1<br>Э1 Э2 Э3    |  |  |  |
| 5.4   | Сглаживание поверхностного гофра /Лек/                     | 1 | 1 | УК-2-31 УК-2-В1 УК-2-У1 УК-1-31 УК-1-У1 УК-1-В1 ПК-3-31 ПК-3-У1 | Л1.1 Л1.2 Л1.3Л2.1Л3.1<br>Э1 Э2 Э3    |  |  |  |
| 5.5   | Выполнение индивидуального задания /Ср/                    | 1 | 3 | ПК-3-31 ПК-3-У1 УК-2-31 УК-2-У1 УК-2-В1 УК-1-31 УК-1-У1 УК-1-В1 | Л1.1 Л1.2 Л1.3Л2.1Л3.1<br>Э1 Э2 Э3    |  |  |  |
| 5.6   | Компьютерное моделирование зернограничной диффузии /Лаб/   | 1 | 2 | УК-1-31 УК-2-У1 УК-2-31 УК-2-В1 УК-1-У1 УК-1-В1 ПК-3-31 ПК-3-У1 | Л1.1 Л1.2 Л1.3Л2.1Л3.1<br>Э1 Э2 Э3    |  |  |  |
| 5.7   | Канавки термического и жидкометаллического травления /Лек/ | 1 | 2 | УК-1-31 УК-2-У1 УК-2-31 УК-2-В1 УК-1-У1 УК-1-В1 ПК-3-31 ПК-3-У1 | Л1.1 Л1.2 Л1.3Л2.1Л3.1<br>Э1 Э2 Э3    |  |  |  |
| 5.8   | Выполнение индивидуального задания /Ср/                    | 1 | 3 | УК-1-В1 УК-2-В1 УК-2-31 УК-2-У1 УК-1-31 УК-1-У1 ПК-3-31 ПК-3-У1 | Л1.1 Л1.2 Л1.3Л2.1Л3.1<br>Э1 Э2 Э3    |  |  |  |

|      |  |   |   |   |                                 |  |  |  |
|------|--|---|---|---|---------------------------------|--|--|--|
| 5.9  | Компьютерное моделирование зернограничной диффузии /Лаб/     | 1 | 2 | УК-1-31 УК-2-В1 УК-2-31 УК-2-У1 УК-1-У1 УК-1-В1 ПК-3-31 ПК-3-У1 | Л1.1 Л1.2 Л1.3Л2.1Л3.1 Э1 Э2 Э3 |  |  |  |
| 5.10 | Выполнение индивидуального задания. Подготовка к зачету /Ср/ | 1 | 6 | УК-1-В1 ПК-3-31 ПК-3-У1 УК-2-31 УК-2-У1 УК-2-В1 УК-1-31 УК-1-У1 | Л1.1 Л1.2Л2.1Л3.1 Э1 Э2 Э4 Э5   |  |  |  |

## 5. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

### 5.1. Контрольные мероприятия (контрольная работа, тест, коллоквиум, экзамен и т.п), вопросы для самостоятельной подготовки

| Код КМ | Контрольное мероприятие | Проверяемые индикаторы компетенций                                      | Вопросы для подготовки  |
|--------|-------------------------|---|---|
| КМ1    | Тест                    | ПК-3-У1;ПК-3-31;УК-1-У1;УК-2-В1;УК-1-31;УК-2-У1;УК-2-31;УК-1-В1;ПК-3-В1 | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. При увеличении температуры от 100 С до 300 С поверхностное натяжение вещества линейно изменяется на 0,5 Дж/м<sup>2</sup>. Определите поверхностное сгущение энтропии.</li> <li>2. При 400 К поверхностное натяжение равно 0,94 Дж/м<sup>2</sup>. Определите поверхностное натяжение при 300 К, если поверхностное сгущение энтропии составляет 1,7Е-3 Дж/(К.м<sup>2</sup>) и не зависит от температуры.</li> <li>3. Определите поверхностное сгущение внутренней энергии, энтальпии, энтропии, энергии Гельмгольца, энергии Гиббса, теплоемкости при 1000 К, если все <math>\Gamma(i) = 0</math>, а зависимость поверхностного натяжения от температуры подчиняется уравнению <math>\sigma = 1,5 - 2E-4T - 0,4E-5T^2</math> [Дж/м<sup>2</sup>].</li> <li>4. При 500 К поверхностное сгущение внутренней энергии составляет 2 Дж/м<sup>2</sup>, а энтропии 4Е-4 Дж/(Км<sup>2</sup>). Определите поверхностное сгущение большого потенциала Гиббса при этой температуре.</li> <li>5. Зависимость поверхностного сгущения энтропии от температуры выражается уравнением <math>S(f)/f = 1E-3 + 2E-4T - 1E-7T^2</math> [Дж/(Км<sup>2</sup>)]. Определите поверхностное сгущение теплоемкости при 500 К.</li> <li>6. При нагреве от 100 до 400 К поверхностное натяжение изменилось на 0,3 Дж/м<sup>2</sup>. Определите поверхностное сгущение энтропии.</li> <li>7. На рисунке приведена зависимость поверхностного натяжения от концентрации для разбавленного раствора. Нарисуйте схематически зависимость адсорбции от концентрации.</li> <li>8. На рисунке приведена зависимость адсорбции от концентрации для разбавленного раствора. Нарисуйте схематически зависимость поверхностного натяжения раствора от концентрации.</li> <li>9. На рисунке представлены две изотермы адсорбции (параллельные линии). В каком случае адсорбционная емкость больше и почему?</li> <li>10. На рисунке представлены две изотермы адсорбции (пересекающиеся линии). В каком из двух случаев емкость адсорбента больше и почему?</li> <li>11. Нарисуйте изотерму Лангмюра для адсорбции одного и того же газа на одном и том же адсорбенте для двух температур, если <math>T(1) &lt; T(2)</math>.</li> <li>12. Нарисуйте изотерму Жуховицкого для совершенного раствора, если <math>b &lt; 1</math>.</li> <li>13. Нарисуйте изотерму БЭТ, если <math>g = 1</math>.</li> <li>14. В разбавленном растворе присутствуют две поверхностно-активные примеси, причем <math>b(2)/b(3) = 10</math>, а <math>c(2) = c(3)</math>. Какая из них сильнее адсорбируется и во сколько раз, если адсорбция подчиняется изотерме Лангмюра?</li> </ol> |



15. В разбавленном растворе присутствуют две поверхностно-активные примеси с одинаковой концентрацией. Какая из них адсорбируется сильнее и во сколько раз, если адсорбция подчиняется изотерме Лангмюра, а  $b(2)/b(3) = 0,5$ ?
16. Напишите изотерму Лангмюра для адсорбции 3-го компонента в трехкомпонентном разбавленном растворе.
17. Нарисуйте схематически изотерму БЭТ, если теплота адсорбции равна теплоте конденсации.
18. Напишите уравнение изотермы Лангмюра для адсорбции второго компонента из четырехкомпонентного раствора (1 – растворитель, 2,3 и 4 – примеси).
19. При каких условиях изотерма БЭТ совпадает с изотермой Лангмюра?
20. Чему равно отношение доли занятых мест в четвертом слое к третьему в изотерме БЭТ, если равновесное давление пара составляет 500 Па, а давление насыщенного пара – 1000 Па?
21. При каких условиях изотерма адсорбции Фаулера совпадает с изотермой Жуховицкого?
22. При каких условиях изотерма адсорбции Фаулера совпадает с изотермой Лангмюра?
23. Как определить критическую температуру расслаивания регулярного раствора?
24. Коэффициент активности первого компонента бинарного раствора в поверхностном слое равен 1,2. Определите, при каких значениях мольной доли этого компонента в поверхностном слое может возникнуть расслоение?
25. Во сколько раз отличаются активности первого компонента объемного и поверхностного растворов при 1000 К, если поверхностное натяжение раствора больше поверхностного натяжения первого компонента на  $8 \text{ Дж/м}^2$ , а емкость поверхностного слоя составляет  $1\text{E-3} \text{ моль/м}^2$ .
26. Что больше и на сколько: поверхностное натяжение раствора, рассчитанное по уравнению Шишковского или Жуховицкого, если концентрация примеси  $X(2) = 0,1$ ,  $T = 700\text{C}$ ,  $b = 5$ , емкость адсорбента составляет  $1\text{E-3} \text{ моль/м}^2$ ? Константы адсорбционного равновесия одинаковы.
27. Рассчитайте состав поверхностного слоя эквимолярного раствора ( $X(1)/X(2)$ ) при 300 К, если поверхностные натяжения компонентов равны  $0,02$  и  $0,03 \text{ Дж/м}^2$ , соответственно, а емкость поверхностного слоя составляет  $1\text{E-5} \text{ моль/м}^2$ . Примите поверхностный и объемный раствор совершенными.
28. Мольная доля первого компонента в поверхностном слое бинарного раствора составляет  $0,2$ . Определите, при каких значениях коэффициента активности первого компонента в поверхностном слое может возникнуть расслоение?
29. В регулярном растворе  $X(1)^f = 0,3$ , а коэффициент активности равен 3. Определите, возможно ли расслоение раствора при температуре 1000 К?
30. В совершенных растворах с объемной концентрацией второго компонента  $X(2)=0,4$  при 300 К и вдвое меньшей при 350 К концентрация второго компонента в поверхностном слое одинакова. Определите теплоту адсорбции.
31. В совершенных растворах с объемной концентрацией второго компонента  $X(2)=0,4$  при 300 К и вдвое меньшей при неизвестной температуре концентрация второго компонента в поверхностном слое одинакова. Определите неизвестную температуру, если теплота адсорбции составляет  $-25 \text{ кДж/моль}$ .
32. Совершенный раствор содержит  $X(2)=0,2$  второго компонента. Определите поверхностное натяжение раствора, при температуре 1000 К, если емкость поверхностного слоя составляет  $Z = 1\text{E-5} \text{ моль/м}^2$ , константа адсорбционного равновесия равна 10, а поверхностное натяжение чистого второго компонента составляет  $\sigma(2) = 1,5 \text{ Дж/м}^2$ .
33. Адсорбция второго компонента составляет 10% от емкости адсорбента, а концентрация второго компонента равна  $X(2)=0,1$ . Определите константу адсорбционного равновесия при 400 К, считая адсорбцию подчиняющейся изотерме Генри.
34. При спрямлении изотермы в координатах  $P/\Gamma = f(P)$

тангенс угла наклона прямой составил  $150 \text{ м}^2/\text{г}$ , а при спрямлении в координатах  $\Gamma/P = f(\Gamma)$  составил  $-2,5\text{E}-5 \text{ м}^2/\text{Н}$ . Рассчитайте адсорбцию при давлении  $1\text{E}4 \text{ Па}$ .

35. При спрямлении изотермы Лангмюра тангенс угла наклона прямой равен  $-8,3\text{E}-4 \text{ м}/(\text{кгс}^2)$ . При каком давлении адсорбция составит  $2,3\text{E}-5 \text{ г}/\text{м}^2$ , если емкость адсорбента составляет  $2,3\text{E}-4 \text{ г}/\text{м}^2$ ? Ответ дайте в Па.

36. При спрямлении изотермы Лангмюра при  $300 \text{ К}$  отсекаемый отрезок составил  $2\text{E}7 \text{ м}/\text{с}^2$ . Определите теплоту адсорбции, если константа адсорбционного равновесия при  $400 \text{ К}$  равна  $5\text{E}-2 \text{ л}/\text{Па}$ , а емкость адсорбента составляет  $1\text{E}-8 \text{ кг}/\text{м}^2$ .

37. При спрямлении изотермы в координатах  $P/\Gamma = f(P)$  при  $400 \text{ К}$  отсекаемый отрезок составил  $1 \text{ Н}/\text{г}$ , а тангенс угла наклона  $7\text{E}-3 \text{ м}^2/\text{г}$ . Рассчитайте адсорбцию при  $450 \text{ К}$  и давлении  $1000 \text{ Па}$ , если теплота адсорбции равна  $-10 \text{ кДж}/\text{моль}$ .

38. При спрямлении изотермы в координатах  $\Gamma/P = f(\Gamma)$  при  $450 \text{ К}$  отсекаемый отрезок составил  $1 \text{ г}/\text{Н}$ , а тангенс угла наклона прямой  $-7\text{E}-3 \text{ л}/\text{Па}$ . Рассчитайте адсорбцию при  $400 \text{ К}$  и давлении  $100 \text{ Па}$ , если теплота адсорбции равна  $-10 \text{ кДж}/\text{моль}$ .

39. В изотерме БЭТ  $b = b' = 1/3R$ . Определите долю занятой поверхности.

40. В изотерме БЭТ  $b = b'$ . При температуре  $500 \text{ К}$  доля свободной поверхности равна  $0,3$ , а при  $800 \text{ К}$   $0,6$ . Определите теплоту адсорбции, если концентрация компонента в объеме одинакова.

41. В изотерме адсорбции БЭТ  $g = 0,5$ , а отношение равновесного давления к давлению насыщенного пара составляет  $P/P(0) = 0,5$ . Определите долю свободной поверхности.

42. При увеличении равновесного давления с  $1 \text{ кПа}$  до  $5 \text{ кПа}$  доля свободной поверхности в изотерме БЭТ уменьшается в два раза. Определите давление насыщенного пара, если  $b = 2b'$ .

43. Доля свободной поверхности в изотерме БЭТ при увеличении температуры с  $30 \text{ С}$  до  $40 \text{ С}$  не изменяется при равновесном давлении  $200 \text{ Па}$ . Теплота адсорбции составляет  $-17,6 \text{ кДж}/\text{моль}$ . Давление насыщенного пара адсорбата при  $30\text{С}$  составляет  $400 \text{ Па}$ . Определите теплоту конденсации адсорбата.

44. Какое предположение о границе зерна надо сделать, чтобы изотерма МакЛина-Хондраса стала изотермой Лангмюра-Жуховицкого?

45. Максимальная доля доступных мест  $X(0)b$  увеличивается с  $0,7$  до  $0,9$ . Как изменяется концентрация атомов на границе зерна  $X(2)b$ , если концентрация атомов в объеме и константа адсорбционного равновесия не меняются?

46. Отношение констант адсорбционного равновесия с учетом и без учета доступных мест составляет  $b'/b = 0,7$ . Концентрация атомов в зерне составляет  $X(2) = 0,2$ , а на поверхности зерна  $X(2)b = 0,5$ . Определите константу адсорбционного равновесия.

47. При температуре  $500 \text{ К}$  концентрация атомов в границе зерна составила  $(2)b1 = 0,5$ , а при температуре  $800 \text{ К}$   $X(2)b2 = 0,3$ . Концентрация атомов в объеме в обоих случаях составляет одинакова, а максимальная доля доступных мест равна  $0,8$ . Определите теплоту адсорбции.

48. При концентрации атомов в зерне  $X(2) = 0,4$  концентрация в границе составила  $X(2)b = 0,6$ , Константа адсорбционного равновесия равна  $5$ . Определите долю доступных мест в границе зерна.

49. Отношение доли доступных мест в границе зерна к концентрации второго компонента в границе зерна составило  $1,4$ . Рассчитайте величину константы адсорбционного равновесия, если концентрация второго компонента в объеме в три раза больше первого.

50. При спрямлении изотермы адсорбции в координатах  $X(0) b * X(2)/X(2)b = f(X(2))$  отсекаемый отрезок при  $2000\text{С}$  равен  $5$ , а при  $3000\text{С}$  равен  $10$ . Определите теплоту адсорбции.

51. Изотерма адсорбции спрямляется в координатах  $X(2)/X(2)b = f(X(2))$ . Отсекаемый отрезок равен  $5$ , а тангенс угла наклона прямой составил  $-3,75$ . Определите максимальную долю

|   |                 |   | <p>доступных мест.</p> <p>52. При концентрации атомов в зерне <math>X(2)' = 0,4</math> концентрация в границе зерна составила <math>X(2)b' = 0,5</math>, а при <math>X(2)'' = 0,5</math> <math>X(2)b'' = 0,57</math>. Определите долю доступных мест в границе зерна.</p> <p>53. Изотерма адсорбции спрямляется в координатах <math>X(0)b * X(2)/X(2)b = f(X(2))</math>, и тангенс угла наклона прямой при 400 К составил -0,1. Константа адсорбционного равновесия при 500 К равна 0,1. Определите теплоту адсорбции.</p>  |
|---|-----------------|---|---|
| <b>5.2. Перечень работ, выполняемых по дисциплине (Курсовая работа, Курсовой проект, РГР, Реферат, ЛР, ПР и т.п.)</b> |                 |   |   |
| Код работы  | Название работы | Проверяемые индикаторы компетенций                                      | Содержание работы   |
| P1  | ДЗ-1            | УК-2-У1;УК-1-31;УК-1-В1;УК-2-31;УК-2-В1;УК-1-У1;ПК-3-31;ПК-3-У1;ПК-3-В1 | <p>Домашнее задание № 1 по разделу «Термодинамика поверхностей раздела»</p> <p>Домашнее задание «Определение параметров адсорбции в регулярном растворе» к учебному пособию «Физика процессов на поверхностях раздела в металлах и сплавах» выполняется студентами при изучении раздела «Термодинамика поверхностей раздела» курса «Физика поверхностей раздела в твердых телах».</p> <p>Цель работы: на основе исходных данных по зависимости поверхностного натяжения от состава регулярного объемного раствора и параметров объемного раствора определить теплоту смешения в регулярном поверхностном растворе.</p> <p>Для того, чтобы определить теплоту смешения регулярного раствора необходимо знать зависимость активности <math>i</math>-компонента от состава. Активность компонента в поверхностном слое вычисляется по первому уравнению Жуховицкого, а состав поверхностного слоя – по данным о зависимости адсорбции <math>i</math>-компонента от состава раствора в объеме.</p> <p>Активность компонента в объемном регулярном растворе рассчитывается по известному значению теплоты смешения. Адсорбция первого компонента от состава раствора вычисляется с учетом выбора разделяющей поверхности таким образом, чтобы сумма адсорбций обоих компонентов бинарного раствора в адсорбционном уравнении Гиббса равнялась нулю. По рис. 1 графически определяется величина адсорбции для каждого состава, и состав поверхностного раствора.</p> <p>Теплоты смешения в поверхностном растворе определяется графически по зависимости коэффициента активности первого компонента в поверхностном растворе от состава поверхностного раствора.</p> <p>При вычислении составов, активностей и величины адсорбции используются уравнения для объемного и поверхностного растворов.</p> <p>Отчет о домашнем задании должен содержать</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. График зависимости поверхностного натяжения раствора от концентрации второго компонента с указанием областей положительной и отрицательной адсорбции.</li> <li>2. Расчет активности первого компонента в объемном растворе для всех составов, за исключением крайних значений .</li> <li>3. Расчет активности первого компонента в поверхностном растворе для всех составов, за исключением крайних значений.</li> <li>4. График зависимости поверхностного натяжения от активности компонента.</li> <li>5. Расчет адсорбции первого компонента для всех составов, за исключением крайних значений.</li> <li>6. Расчет состава поверхностного слоя.</li> <li>7. Расчет коэффициента активности в поверхностном слое для всех составов, за исключением крайних значений.</li> <li>8. График зависимости коэффициента активности первого компонента от состава поверхностного слоя.</li> <li>9. Расчет теплоты смешения в поверхностном слое.</li> </ol> <p>Пример варианта домашнего задания</p> <p><b>АДСОРБЦИЯ В РЕГУЛЯРНОМ РАСТВОРЕ</b></p> |

|                             |       |       |  |       |       |       |  |  |  |  |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |  |  |  |                             |       |       |       |       |       |       |  |       |       |       |       |  |  |
|-----------------------------|-------|-------|--|-------|-------|-------|--|--|--|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|--|--|--|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|-------|-------|-------|-------|--|--|
|                             |       |       | <p>Вариант №</p> <p>Емкость поверхностного слоя <math>z</math> регулярного раствора составляет <math>1E-5</math> моль/м<sup>2</sup>, температура 1100 К, теплота смешения в объеме раствора <math>E = 10</math> кДж/моль. В таблице приведена зависимость поверхностного натяжения регулярного раствора от концентрации компонента в объеме:</p> <table data-bbox="722 398 1525 582"> <tr> <td>X(1)</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>0,1</td> <td>0,2</td> <td>0,3</td> <td>0,4</td> <td>0,5</td> <td>0,6</td> <td>0,7</td> </tr> <tr> <td>0,8</td> <td>0,9</td> <td>1,0</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Сигма,<br/>Дж/м<sup>2</sup></td> <td>0,701</td> <td>0,668</td> <td>0,651</td> <td>0,640</td> <td>0,632</td> <td>0,625</td> </tr> <tr> <td></td> <td>0,619</td> <td>0,613</td> <td>0,607</td> <td>0,600</td> <td></td> <td></td> </tr> </table> <p>Последовательность выполнения домашнего задания</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Рассчитайте активность первого компонента в объеме раствора.</li> <li>2. Определите графически адсорбцию первого компонента на поверхности для восьми значений <math>x_1</math> от 0,2 до 0,9, приняв <math>\Gamma(1) + \Gamma(2) = 0</math>.</li> <li>3. Рассчитайте концентрацию компонента на поверхности.</li> <li>4. Рассчитайте активность первого компонента в поверхностном слое.</li> </ol> | X(1)  |       |       |  |  |  |  | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1,0 |  |  |  |  | Сигма,<br>Дж/м <sup>2</sup> | 0,701 | 0,668 | 0,651 | 0,640 | 0,632 | 0,625 |  | 0,619 | 0,613 | 0,607 | 0,600 |  |  |
| X(1)                        |       |       |  |       |       |       |  |  |  |  |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |  |  |  |                             |       |       |       |       |       |       |  |       |       |       |       |  |  |
| 0,1                         | 0,2   | 0,3   | 0,4  | 0,5   | 0,6   | 0,7   |  |  |  |  |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |  |  |  |                             |       |       |       |       |       |       |  |       |       |       |       |  |  |
| 0,8                         | 0,9   | 1,0   |  |       |       |       |  |  |  |  |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |  |  |  |                             |       |       |       |       |       |       |  |       |       |       |       |  |  |
| Сигма,<br>Дж/м <sup>2</sup> | 0,701 | 0,668 | 0,651  | 0,640 | 0,632 | 0,625 |  |  |  |  |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |  |  |  |                             |       |       |       |       |       |       |  |       |       |       |       |  |  |
|                             | 0,619 | 0,613 | 0,607  | 0,600 |       |       |  |  |  |  |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |  |  |  |                             |       |       |       |       |       |       |  |       |       |       |       |  |  |

| P2         | ДЗ-2                       | УК-2-В1;УК-1-31;ПК-3-У1;УК-2-У1;УК-2-31;УК-1-У1;УК-1-В1;ПК-3-31;ПК-3-В1 | <p>Домашнее задание № 2 к разделу «Термодинамика поверхностей раздела» (многовариантная задача)</p> <p>Домашнее задание «Адсорбция в совершенном растворе» к учебному пособию «Физика процессов на поверхностях раздела в металлах и сплавах» выполняется студентами при изучении «Термодинамика поверхностей раздела» курса «Физика поверхностей раздела в твердых телах».</p> <p>Цель работы: рассчитать адсорбцию и поверхностное натяжение совершенного раствора для двухкомпонентной системы, если при адсорбции атомы становятся молекулами.</p> <p>В двухкомпонентной системе А-В объемный раствор состоит из атомов А и В, а поверхностный – из молекул А(2) и В(2). Оба раствора (и объемный, и поверхностный) являются совершенными. Атомные объемы компонентов равны и составляют половину мольного объема. Процесс адсорбции состоит в замене молекул А(2) в поверхностном растворе молекулами В(2).</p> <p>Пример варианта домашнего задания<br/>АДСОРБЦИЯ В СОВЕРШЕННОМ РАСТВОРЕ</p> <p>Вариант №</p> <p>В двухкомпонентной системе А-В объемный и поверхностный растворы – совершенные, причем объемный состоит из атомов А и В, а поверхностный – из молекул А<sub>2</sub> и В<sub>2</sub>. Атомные объемы компонентов равны и составляют половину мольного объема. Адсорбция компонента В состоит в замене молекул А<sub>2</sub> в поверхностном растворе молекулами В<sub>2</sub> по реакции <math>2В + А(2) = В(2) + 2А</math>. Константа равновесия <math>b</math> реакции может быть вычислена по уравнению Аррениуса.</p> <p>Число мест в поверхностном слое <math>z</math> совершенного раствора составляет <math>20 \text{ ат/нм}^2</math>. температура 500 К, теплота адсорбции <math>0,1 \text{ эВ/ат.}</math>, мольная доля компонента В в объеме – <math>0,1</math>. Поверхностное натяжение чистого компонента А составляет <math>1 \text{ Дж/м}^2</math>. Рассчитайте поверхностный избыток (адсорбцию) компонента В и и поверхностное натяжение раствора в предположении <math>\Gamma(A) + \Gamma(B) = 0</math>.</p> <p>Таблица<br/>Варианты заданий и решения</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">% варианта</th> <th colspan="2">Исходные данные</th> <th colspan="4">Решения</th> </tr> <tr> <th>X(B)<br/>ат/нм<sup>2</sup></th> <th>Т, К</th> <th>E(адс), эВ/ат.</th> <th>X(B)<sub>2</sub></th> <th colspan="2">Г(B),</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0,2</td> <td>500</td> <td>0,1</td> <td>0,389</td> <td>3,785</td> <td>0,997</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0,2</td> <td>500</td> <td>0,2</td> <td>0,867</td> <td>13,33</td> <td>0,892</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>0,1</td> <td>500</td> <td>0,2</td> <td>0,562</td> <td>9,243</td> <td>0,958</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>0,1</td> <td>500</td> <td>0,3</td> <td>0,929</td> <td>16,58</td> <td>0,832</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>0,1</td> <td>600</td> <td>0,3</td> <td>0,804</td> <td>14,08</td> <td>0,883</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>0,2</td> <td>600</td> <td>0,3</td> <td>0,954</td> <td>15,08</td> <td>0,782</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>0,2</td> <td>600</td> <td>0,3</td> <td>0,954</td> <td>18,85</td> <td>0,727</td> </tr> <tr> <td>8</td> <td>0,2</td> <td>600</td> <td>0,2</td> <td>0,750</td> <td>13,74</td> <td>0,903</td> </tr> <tr> <td>9</td> <td>0,2</td> <td>600</td> <td>0,1</td> <td>0,302</td> <td>2,552</td> <td>1,009</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>0,1</td> <td>600</td> <td>0,1</td> <td>0,079</td> <td>-0,531</td> <td>1,013</td> </tr> </tbody> </table> | % варианта        | Исходные данные |       | Решения |  |  |  | X(B)<br>ат/нм <sup>2</sup> | Т, К | E(адс), эВ/ат. | X(B) <sub>2</sub> | Г(B), |  | 1 | 0,2 | 500 | 0,1 | 0,389 | 3,785 | 0,997 | 2 | 0,2 | 500 | 0,2 | 0,867 | 13,33 | 0,892 | 3 | 0,1 | 500 | 0,2 | 0,562 | 9,243 | 0,958 | 4 | 0,1 | 500 | 0,3 | 0,929 | 16,58 | 0,832 | 5 | 0,1 | 600 | 0,3 | 0,804 | 14,08 | 0,883 | 6 | 0,2 | 600 | 0,3 | 0,954 | 15,08 | 0,782 | 7 | 0,2 | 600 | 0,3 | 0,954 | 18,85 | 0,727 | 8 | 0,2 | 600 | 0,2 | 0,750 | 13,74 | 0,903 | 9 | 0,2 | 600 | 0,1 | 0,302 | 2,552 | 1,009 | 10 | 0,1 | 600 | 0,1 | 0,079 | -0,531 | 1,013 |
|------------|----------------------------|---|--|-------------------|-----------------|-------|---------|--|--|--|----------------------------|------|----------------|-------------------|-------|--|---|-----|-----|-----|-------|-------|-------|---|-----|-----|-----|-------|-------|-------|---|-----|-----|-----|-------|-------|-------|---|-----|-----|-----|-------|-------|-------|---|-----|-----|-----|-------|-------|-------|---|-----|-----|-----|-------|-------|-------|---|-----|-----|-----|-------|-------|-------|---|-----|-----|-----|-------|-------|-------|---|-----|-----|-----|-------|-------|-------|----|-----|-----|-----|-------|--------|-------|
| % варианта | Исходные данные            |   | Решения  |                   |                 |       |         |  |  |  |                            |      |                |                   |       |  |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |    |     |     |     |       |        |       |
|            | X(B)<br>ат/нм <sup>2</sup> | Т, К  | E(адс), эВ/ат.   | X(B) <sub>2</sub> | Г(B),           |       |         |  |  |  |                            |      |                |                   |       |  |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |    |     |     |     |       |        |       |
| 1          | 0,2                        | 500   | 0,1  | 0,389             | 3,785           | 0,997 |         |  |  |  |                            |      |                |                   |       |  |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |    |     |     |     |       |        |       |
| 2          | 0,2                        | 500   | 0,2  | 0,867             | 13,33           | 0,892 |         |  |  |  |                            |      |                |                   |       |  |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |    |     |     |     |       |        |       |
| 3          | 0,1                        | 500   | 0,2  | 0,562             | 9,243           | 0,958 |         |  |  |  |                            |      |                |                   |       |  |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |    |     |     |     |       |        |       |
| 4          | 0,1                        | 500   | 0,3  | 0,929             | 16,58           | 0,832 |         |  |  |  |                            |      |                |                   |       |  |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |    |     |     |     |       |        |       |
| 5          | 0,1                        | 600   | 0,3  | 0,804             | 14,08           | 0,883 |         |  |  |  |                            |      |                |                   |       |  |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |    |     |     |     |       |        |       |
| 6          | 0,2                        | 600   | 0,3  | 0,954             | 15,08           | 0,782 |         |  |  |  |                            |      |                |                   |       |  |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |    |     |     |     |       |        |       |
| 7          | 0,2                        | 600   | 0,3  | 0,954             | 18,85           | 0,727 |         |  |  |  |                            |      |                |                   |       |  |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |    |     |     |     |       |        |       |
| 8          | 0,2                        | 600   | 0,2  | 0,750             | 13,74           | 0,903 |         |  |  |  |                            |      |                |                   |       |  |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |    |     |     |     |       |        |       |
| 9          | 0,2                        | 600   | 0,1  | 0,302             | 2,552           | 1,009 |         |  |  |  |                            |      |                |                   |       |  |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |    |     |     |     |       |        |       |
| 10         | 0,1                        | 600   | 0,1  | 0,079             | -0,531          | 1,013 |         |  |  |  |                            |      |                |                   |       |  |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |   |     |     |     |       |       |       |    |     |     |     |       |        |       |

|    |      |   |  |
|----|------|---|--|
| Р3 | ДЗ-3 | ПК-3-В1;ПК-3-31;УК-1-В1;УК-1-31;УК-1-У1;УК-2-В1;УК-2-У1;УК-2-31;ПК-3-У1 | <p>Домашнее задание № 3 к разделу «Диффузия по границам зерен» Домашнее задание «Определение параметров зернограничной диффузии» к учебному пособию «Физика процессов на поверхностях раздела в металлах и сплавах» выполняется студентами при изучении раздела «Диффузия по границам зерен» курса «Физика поверхностей раздела в твердых телах».</p> <p>Цель работы: на основе компьютерного эксперимента определить коэффициенты диффузии объемной и зернограничной диффузии при разных температурах и рассчитать энергии активации.</p> <p>Вариант домашнего задания выбирается из предлагаемых вариантов или может быть задан преподавателем для определенного типа образца, диффузионных характеристик процесса и проводимого эксперимента.</p> <p>В работе изучается самодиффузия из тонкого слоя сверху в массивный образец, представляющий собой бикристалл, поликристалл или тонкую пленку.</p> <p>На первом этапе производится подготовка серии образцов для их последующего исследования методом микрорентгеноспектрального анализа (МРСА). Для подготовки образцов необходимо запустить программу GBDsamples.exe. Для задания номера варианта в правой части открывшегося окна нужно отметить «By code» и в появившемся поле «Code» ввести номер. Если параметры диффузии и вид образца задаются вручную, то используется окно «Manual», а в меню «Parameters» вводятся исходные данные.</p> <p>После введения первичных данных, тип используемого образца появится в левой части окна, а информация об условиях эксперимента (интервал температур и максимальное время отжига) – в правой. Для проведения отжига необходимо задать температуру и время и нажать «Heating». Процесс нагрева можно прервать в любой момент нажатием «Stop» и после продолжить.</p> <p>Распределение диффузанта в образце во время отжига демонстрируется в левой части окна программы. По завершении отжига данные отжига образца необходимо сохранить, нажав «Samples»→ «Save sample». Для проверки воспроизводимости получаемых экспериментальных результатов необходимо провести эксперимент при разных временах отжига. Все образцы, приготовленные на первом этапе, сохраняются для анализа.</p> <p>На втором этапе производится анализ приготовленных на первом этапе образцов методом МРСА. Для анализа необходимо запустить программу GBDanalysis.exe. Для загрузки приготовленных образцов выбирают «File»→ «Load sample» и указывают имя файла. После запуска появляется окно, в левой части которого находится изображение образца для исследования.</p> <p>Область анализа указана квадратом, расположенным на профиле образца. Измерение концентрации проводится вдоль линии, расположенной в центре анализируемой области. Сдвиг квадрата осуществляется стрелками, расположенными в нижней левой части окна. Размеры квадрата можно менять, используя стрелки «влево/вправо» под окном. Чем больше область анализа, тем больше статистика измерений и, следовательно, меньше случайная ошибка. Однако, при низких температурах отжига диффузионные пути небольшие, что заставляет уменьшать зону анализа.</p> <p>Отображение анализируемой области с распределением диффузанта достигается нажатием «Show map» в правой нижней части окна.</p> <p>Также можно корректировать размер линии сканирования нажатием стрелок в верхней правой части окна. При нажатии на «Scan» в левом окне отображаются результаты сканирования. Измерения концентрации на каждом образце проводят как на границе зерна, так и вдали от границы с целью определения коэффициента объемной диффузии, необходимого при вычислении коэффициента зернограничной диффузии.</p> <p>Результат сканирования отображается в левой части окна в виде графика. Программа предлагает следующий возможный выбор координат: по оси ординат – <math>\ln C</math> (натуральный логарифм измеренной концентрации), по оси абсцисс – <math>x</math> (координатная ось, параллельная поверхности образца), <math>y</math> (координатная ось,</p> |
|----|------|---|--|

|  |  |  |  |
|--|--|--|--|
|  |  |  | <p>перпендикулярная поверхности образца), <math>u_6/5</math>, <math>y_2</math>. В зависимости от типа образца и задач измерений студент выбирает координаты спрямления: <math>\ln C_{y_2}</math> при определении коэффициента объемной диффузии, <math>\ln C_{y_1}</math> или <math>\ln C_{u_6/5}</math> при определении коэффициента зернограничной диффузии. Результатом измерения концентрации вещества по глубине является тангенс угла наклона прямой, полученной в координатах спрямления, который выводится в окне программы.</p> <p>По завершении процедуры сканирования результаты сохраняются нажатием «File»→«Save scan data». При этом происходит запись результатов сканирования в файл с расширением «.dat», который впоследствии можно обработать в различных программах для корректировки результатов.</p> <p>Отчет о домашнем задании должен содержать</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Описание каждого образца, включая выбор температур и времен отжига; вид образца до отжига и после.</li> <li>2. Параметры измерения концентрации, включая размеры и позицию области сканирования.</li> <li>3. Объяснение выбора координат спрямления.</li> <li>4. Порядок определения и значения коэффициентов объемной и зернограничной диффузии для каждого измерения.</li> <li>5. Концентрационные профили в координатах спрямления.</li> <li>6. Зависимости <math>\ln D</math> от <math>1/T</math> и <math>\ln D(b)</math> от <math>1/T</math>.</li> <li>7. Рассчитанные значения предэкспоненциального множителя и энергии активации объемной и зернограничной диффузии.</li> <li>8. Обсуждение воспроизводимости результатов.</li> <li>9. Определение кинетических режимов отжигов.</li> <li>10. Выводы.</li> </ol> |
|--|--|--|--|

### 5.3. Оценочные материалы, используемые для экзамена (описание билетов, тестов и т.п.)

|   |
|---|
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. На какой глубине от поверхности лучше изучать слоевую активность при самодиффузии в режиме “В” (по Харрисону)?</li> <li>2. Почему решение Фишера для зернограничной диффузии называют квазистационарным?</li> <li>3. Нарисуйте, как зависит от времени отжига концентрация в границе зерна, в двух точках на разном расстоянии от поверхности в модели Фишера?</li> <li>4. Нарисуйте на одном графике как тройное произведение (<math>P</math>) и коэффициент зернограничной диффузии зависят от температуры отжига?</li> <li>5. Нарисуйте, как изменяется концентрация диффундирующего вещества по линии, перпендикулярной границе зерна, в моделях Фишера и Гиббса?</li> <li>6. Как зависит от времени отжига угол в вершине изоконцентрационного профиля?</li> <li>7. Как зависит от температуры отжига фишеровская длина при самодиффузии?</li> <li>8. Что надо сделать, чтобы гарантированно попасть в режим “А” (по Харрисону): увеличить температуру и время отжига или уменьшить?</li> <li>9. Как зависит температура отжига для перехода из режима “В” в режим “А” (по Харрисону) при самодиффузии от температуры плавления материала при постоянных размерах зерна и времени?</li> <li>10. Когда лучше выполняется условие для режима “В” (по Харрисону) <math>\alpha \gg 1</math>: при повышении температуры отжига или понижении и почему?</li> <li>11. Как сегрегация влияет на температуру отжига для перехода из режима “В” в режим “С” (по Харрисону)?</li> <li>12. От чего и как зависит температура отжига для перехода из режима “В” в режим “А” (по Харрисону) при самодиффузии?</li> <li>13. Какой гофр сглаживается быстрее: частый или редкий?</li> <li>14. Чем по внешнему виду отличается канавка жидкометаллического и термического травления?</li> <li>15. Почему при прочих равных условиях канавка жидкометаллического травления глубже канавки термического травления?</li> <li>16. Почему глубина канавки жидкометаллического травления слабо зависит от температуры?</li> <li>17. Понижение температуры при сглаживании поверхностного гофра способствует преобладанию механизма поверхностной или объемной диффузии? Почему?</li> <li>18. Для зернограничной диффузии меди в никеле при температуре отжига 900 К в течение суток фишеровская длина составила 54 мкм. Определите фишеровскую длину при температуре отжига 800 К за 12 часов. Примите <math>s = 1</math>, <math>E(b) = 0,6E</math>. Воспользуйтесь эмпирическими правилами для самодиффузии никеля (<math>T_{пл} = 1726</math> К).</li> <li>19. Для зернограничной диффузии никеля в меди при температуре отжига 1000 К фишеровская длина составила 19 мкм. Определите время отжига, если энергия активации диффузии в объеме больше энергии активации зернограничной диффузии в 1,6 раза. Примите <math>s = 1</math>, <math>\delta = 1</math> нм. Воспользуйтесь эмпирическими правилами для самодиффузии меди (<math>T_{пл} = 1356</math> К).</li> <li>20. Для зернограничной диффузии меди в алюминии при температуре отжига 300 К в течение 4-х суток слоевая активность на глубине 35 мкм составила <math>1,8E2</math> имп/(мин см<sup>2</sup>), а при 400 К при тех же остальных параметрах <math>1,2E5</math> имп/(мин см<sup>2</sup>). Определите энергию активации диффузии меди в алюминии, если при отжиге при 300 К фишеровская длина</li> </ol> |
|---|

составила 50 мкм, а при 400 К – 90 мкм.

21. Углы в вершине изоконцентрационного профиля, образующиеся при зернограничной диффузии алюминия в меди при температуре отжига 400 К в течение 110 часов и при температуре 410 К в течение 10 часов равны. Определите энергию активации зернограничной диффузии. Примите  $s = 1$ . Воспользуйтесь эмпирическими правилами для самодиффузии меди ( $T(\text{пл}) = 1356 \text{ К}$ ).
22. Угол в вершине изоконцентрационного профиля, образующийся при зернограничной диффузии магния в алюминии при температуре отжига 700 К в течение 100 часов равен  $15^\circ$ . Во сколько раз отличаются энергии активации диффузии в объеме и зернограничной диффузии? Примите  $s = 1$ ,  $\delta = 1 \text{ нм}$ . Воспользуйтесь эмпирическими правилами для самодиффузии алюминия ( $T(\text{пл}) = 933 \text{ К}$ ).
23. Во сколько раз отличаются фишеровский путь диффузии и путь диффузии в объеме при самодиффузии (за 10 часов) при  $0,7T(\text{пл})$ ? Воспользуйтесь эмпирическими правилами для самодиффузии. Примите  $\delta = 1 \text{ нм}$ .
24. Определите время диффузии серебра при 200 С по границе зерна меди толщиной 0,5 нм при отсутствии сегрегации, если фишеровская длина составила 10 мкм. Примите для зернограничной диффузии серебра в меди  $D(0)b = 0,015 \text{ см}^2/\text{с}$  и  $E(b) = 80 \text{ кДж/моль}$ , а для объемной –  $D(0) = 0,2 \text{ см}^2/\text{с}$  и  $E = 163 \text{ кДж/моль}$ .
25. Определите энергию активации зернограничной диффузии цинка в алюминии при отсутствии сегрегации, если после отжига в течение 200 часов при 225 С фишеровская длина составила 113 мкм, а за 75 часов при 325 С – 68 мкм. Примите для диффузии цинка в алюминии  $D(0) = 1,4 \text{ см}^2/\text{с}$ , а  $E = 128,7 \text{ кДж/моль}$ .
26. Угол в вершине изоконцентрационного профиля зернограничной диффузии цинка в алюминии составил  $85^\circ$  градусов после отжига при 300 С за 100 часов. Приняв сегрегацию равной 10, а толщину границы 1 нм, определите коэффициент зернограничной диффузии. В каком режиме (по Харрисону) протекает процесс? Примите для диффузии цинка в алюминии  $D(0) = 1,4 \text{ см}^2/\text{с}$ , а  $E = 128,7 \text{ кДж/моль}$ .
27. При исследовании диффузии никеля по границам зерен меди толщиной 0,5 нм после отжига в течение 20 часов при 700 С обнаружена линейная зависимость логарифма слоевой активности от глубины с углом наклона  $0,05 \text{ 1/мкм}$ . Определите коэффициент зернограничной диффузии никеля в меди. Примите для диффузии никеля в меди  $D(0) = 3,8 \text{ см}^2/\text{с}$ , а  $E = 237,4 \text{ кДж/моль}$ .
28. Определите отношение слоевых активностей цинка ( $T(\text{пл}) = 420 \text{ С}$ ) на глубине 20 и 40 мкм при диффузии цинка в алюминии при 300 С в течение 100 часов при толщине границы 0,5 нм. Как изменится это отношение, если учесть коэффициент сегрегации, равный 10? Примите для диффузии цинка в алюминии  $D(0) = 1,4 \text{ см}^2/\text{с}$ , а  $E = 128,7 \text{ кДж/моль}$ . Для оценок  $D(b)$  воспользуйтесь эмпирическими правилами.
29. Как изменится концентрация компонента в границе зерна на глубине 5 мкм, если при фишеровской длине 20 мкм коэффициент сегрегации увеличится в 100 раз?
30. Фишеровская длина при гетеродиффузии не зависит от температуры. Во сколько раз отличаются абсолютные значения энергии активации диффузии и теплоты сегрегации, если  $E(b) = 0,6E$ ?
31. Фишеровская длина при зернограничной диффузии составляет  $L$  мкм за 100 часов отжига при температуре  $0,4T(\text{пл})$ . При какой температуре отжига (в долях  $T(\text{пл})$ ) в течение 10 часов фишеровская длина останется неизменной, если теплота сегрегации в девять раз меньше энергии активации диффузии. Воспользуйтесь эмпирическими правилами для самодиффузии. Примите  $E(b) = 0,5E$ ?
32. Фишеровские пути при зернограничной диффузии равны при отжиге при температуре 400 К в течение 10 часов и при 450 К в течение 100 часов. Определите теплоту сегрегации. Примите  $E(b) = 0,5E$ ? Воспользуйтесь эмпирическими правилами.
33. Какой температуре диффузионного отжига (в долях  $T(\text{пл})$ ) соответствует условие Харрисона для перехода между режимами “В” и “С” при самодиффузии в течение 100 часов? Примите  $\delta = 1 \text{ нм}$ . Воспользуйтесь эмпирическими правилами для самодиффузии.
34. Условие Харрисона для перехода между режимами “В” и “С” при самодиффузии соответствует температуре  $0,4T(\text{пл})$ . Чему будет равна температура перехода между этими режимами, если увеличить время отжига в 20 раз? Воспользуйтесь эмпирическими правилами для самодиффузии.
35. Какой температуре диффузионного отжига при (в долях  $T(\text{пл})$ ) соответствует условие Харрисона для перехода между режимами “В” и “А” при самодиффузии в течение 1 часа? Примите размер зерна 10 мкм. Воспользуйтесь эмпирическими правилами для самодиффузии.
36. Какому режиму диффузионного отжига (по Харрисону) соответствуют следующие параметры эксперимента: время отжига – 100 часов,  $T = 0,5T(\text{пл})$ ? Примите  $s = 1$ ,  $\delta = 1 \text{ нм}$ ,  $E(b) = 0,5E$ . Воспользуйтесь эмпирическими правилами для самодиффузии.
37. Условие Харрисона для перехода между режимами “В” и “А” при самодиффузии соответствует температуре  $0,8T(\text{пл})$ . Чему будет равна температура перехода, если увеличить время отжига в 3 раза? Воспользуйтесь эмпирическими правилами для самодиффузии.
38. Какой температуре соответствует условие Харрисона для перехода между режимами “В” и “С” при самодиффузии меди в течение 100 часов? Примите толщину границы 1 нм. Температура плавления меди составляет 1356 К. Воспользуйтесь эмпирическими правилами для самодиффузии.
39. Во сколько раз отличаются фишеровская длина и путь диффузии в объеме при самодиффузии (за 10 часов) при  $0,7T(\text{пл})$ ? Примите  $\delta = 1 \text{ нм}$ .
40. Какой температуре соответствует условие Харрисона для перехода между режимами “В” и “А”, при самодиффузии меди в течение 1 часа? Примите размер зерна 10 мкм.
41. Высота поверхностного гофра уменьшилась в 15 раз за 2 часа. Определите длину волны поверхностного гофра. Примите коэффициент  $V = 1E-28 \text{ м}^4/\text{с}$ .
42. Рассчитайте величину поверхностной концентрации атомов меди, если коэффициент  $C$  больше коэффициента  $B$  в 250 раз при  $700^\circ\text{C}$ , используя эмпирические правила для самодиффузии. Для меди  $T(\text{пл}) = 1356 \text{ К}$ ,  $M = 63,5 \text{ г/моль}$ , плотность =  $8,9 \text{ г/см}^3$ . Примите  $E(s) = 1/3E$ .
43. Отношение поверхностного и объемного коэффициентов диффузии при температурах 1200 С и 1300 С



- отличаются в “е” раз. Определите температуру плавления металла, используя эмпирические правила для самодиффузии. Примите  $E(s) = 1/3E$ .
44. Как изменится высота поверхностного гофра с длиной волны 20 мкм при нагреве в течение 2 часов, если уменьшить температуру с  $0,7T(пл)$  до  $0,6T(пл)$ ? Примите разность коэффициентов  $B(1)$  (при  $0,7T(пл)$ ) и  $B(2)$  (при  $0,6T(пл)$ ) равной  $5E-27 м^4/с$ .
45. Длина волны поверхностного гофра составляет 5 мкм. Что преобладает: поверхностная диффузия или объемная, если коэффициенты  $B$  и  $C$  равны  $1E-28 м^4/с$  и  $1E-21 м^3/с$ , соответственно?
46. Пользуясь эмпирическими правилами, определите, какой из механизмов сглаживания синусоидального гофра с длиной волны 30 мкм на поверхности чистой меди ( $T(пл) = 1083 С$ ) преобладает при  $0,7T(пл)$  и толщине границы 1 нм?
47. Глубина канавки жидкометаллического травления в течение 1 часа составила 0,1 мкм. Какое потребуется время травления для увеличения глубины канавки в 2 раза?
48. Как изменится глубина канавки жидкометаллического травления для меди, если увеличить время травления в 8 раз?
49. Канавка термического травления образуется после 16 часов отжига. Сколько времени потребуется на отжиг, чтобы глубина канавки уменьшилась в два раза, если действует механизм поверхностной диффузии?
50. Канавка термического травления образуется после 16 часов отжига. Сколько времени потребуется на отжиг, чтобы глубина канавки уменьшилась в два раза, если действует механизм объемной диффузии?
51. Глубина канавки термического травления в течение 1 часа для меди составила 0,25 мкм. Определите глубину канавки, если увеличить время травления до 2 часов.

#### 5.4. Методика оценки освоения дисциплины (модуля, практики. НИР)

Оценка «отлично» - обучающийся показывает глубокие, исчерпывающие знания в объеме пройденной программы, уверенно применяет полученные знания на практике, грамотно и логически стройно излагает материал при ответе, умеет формулировать выводы из изложенного теоретического материала, знает дополнительно рекомендованную литературу.

Оценка «хорошо» - обучающийся показывает твердые и достаточно полные знания в объеме пройденной программы, допускает незначительные ошибки при освещении заданных вопросов, четко излагает материал.

Оценка «удовлетворительно» - обучающийся показывает знания в объеме пройденной программы, ответы излагает хотя и с ошибками, но уверенно исправляет их после дополнительных и наводящих вопросов.

Оценка «неудовлетворительно» - обучающийся допускает грубые ошибки в ответе, не понимает сущности излагаемого вопроса, не умеет применять знания для решения простых задач, дает неполные ответы на дополнительные и наводящие вопросы.

Оценка «неявка» – обучающийся на экзамен не явился.

## 6. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

### 6.1. Рекомендуемая литература

#### 6.1.1. Основная литература

|      | Авторы, составители                             | Заглавие   | Библиотека             | Издательство, год      |
|------|---|--|------------------------|------------------------|
| Л1.1 | Бокштейн Б. С.                                  | Диффузия в металлах: учеб. пособие для студ. вузов по спец.- Физика металлов | Библиотека МИСиС       | М.: Металлургия, 1978  |
| Л1.2 | Бокштейн Б. С., Менделев М. И., Похвиснев Ю. В. | Физическая химия: термодинамика и кинетика: учебник                          | Электронная библиотека | М.: Изд-во МИСиС, 2012 |
| Л1.3 | Бокштейн Б. С., Ярославцев А. Б.                | Диффузия атомов и ионов в твердых телах                                      | Библиотека МИСиС       | М.: Изд-во МИСиС, 2005 |

#### 6.1.2. Дополнительная литература

|      | Авторы, составители           | Заглавие  | Библиотека       | Издательство, год |
|------|-------------------------------|---|------------------|-------------------|
| Л2.1 | Бокштейн Б. С., Клиндер Л. М. | Физическая химия металлургических процессов. Теория сплавов. Разд.: Теория внутренних поверхностей раздела в металлах и сплавах: Учеб. пособие для студ. спец. 0406, 0407 | Библиотека МИСиС | М.: Учеба, 1984   |

#### 6.1.3. Методические разработки

|      | Авторы, составители | Заглавие                      | Библиотека       | Издательство, год     |
|------|---------------------|-------------------------------|------------------|-----------------------|
| Л3.1 | Бокштейн С. З.      | Диффузия и структура металлов | Библиотека МИСиС | М.: Металлургия, 1973 |

### 6.2. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»

|    |   |   |
|----|---|---|
| Э1 | - Федеральный портал «Российское образование» | : <a href="http://edu.ru">http://edu.ru</a>   |
| Э2 | - Открытое образование                        | <a href="http://openedu.ru">http://openedu.ru</a> ;   |
| Э3 | - Российская государственная библиотека       | <a href="http://www.rsl.ru">http://www.rsl.ru</a>   |
| Э4 | Физика поверхностей раздела в твердых телах   | ( <a href="https://lms.misis.ru/ebooks/physical-chemistry/index.html">https://lms.misis.ru/ebooks/physical-chemistry/index.html</a> ) |
| Э5 | Физика поверхностей раздела в твердых телах   | <a href="https://lms.misis.ru/courses/2157/modules/items/131381">https://lms.misis.ru/courses/2157/modules/items/131381</a>           |

### 6.3 Перечень программного обеспечения

|     |   |
|-----|---|
| П.1 | Физическая химия  |
| П.2 | Зернограничная диффузия   |
| П.3 | Лицензии ПО Windows Server CAL ALNG LicSAPk MVL DvcCAL, ПО WinEDUA3 ALNG SubsVL MVL PerUsr и PerUsr |
| П.4 | ESET NOD32 Antivirus  |
| П.5 | Win Pro 10 32-bit/64-bit  |

### 6.4. Перечень информационных справочных систем и профессиональных баз данных

|     |  |
|-----|--|
| И.1 | — Научная электронная библиотека eLIBRARY <a href="https://elibrary.ru/">https://elibrary.ru/</a>  |
| И.2 | — Полнотекстовые деловые публикации информагентств и прессы по 53 отраслям <a href="https://polpred.com/news">https://polpred.com/news</a> |
| И.3 | Иностранные базы данных (доступ с IP адресов МИСиС):   |

## 7. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

| Ауд.                           | Назначение   | Оснащение   |
|--------------------------------|--|---|
| Читальный зал №3 (Б)           |  | комплект учебной мебели на 44 места для обучающихся, МФУ Xerox VersaLink B7025 с функцией масштабирования текстов и изображений, 8 ПК с доступом к ИТС «Интернет», ЭИОС университета через личный кабинет на платформе LMS Canvas, лицензионные программы MS Office, MS Teams, ESET Antivirus.    |
| Любой корпус<br>Мультимедийная | Учебная аудитория для проведения занятий лекционного типа и/или для проведения практических занятий: | комплект учебной мебели до 36 мест для обучающихся, мультимедийное оборудование, магнитно-маркерная доска, рабочее место преподавателя, ПКс доступом к ИТС «Интернет», ЭИОС университета через личный кабинет на платформе LMS Canvas, лицензионные программы MS Office, MS Teams, ESET Antivirus |
| A-323                          | Компьютерный класс   | комплект учебной мебели пакет на 12 рабочих мест с компьютерами, принтер, лицензионных программ MS Office   |

## 8. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ

Самостоятельная работа обучающихся направлена на углубленное изучение тем дисциплины и предполагает изучение основных и дополнительных источников учебной и научной литературы, подготовку докладов, рефератов, эссе, выполнение курсовых работ и проектов. Материалы докладов, курсовых работ (проектов) в дальнейшем могут быть использованы при выполнении студенческих научных исследований и стать основой для выступления на студенческих научно-практических конференциях, конкурсах студенческих работ.

Самостоятельная работа включает следующие виды деятельности:

- работа с лекционным материалом, предусматривающая проработку конспекта лекций и учебной литературы;
- поиск (подбор) и обзор научной и учебной литературы, электронных источников информации по изучаемой теме дисциплины, написание доклада, выполнение индивидуальных и групповых заданий;
- освоение материала, предусмотренного для самостоятельного изучения;
- подготовка к практическим и семинарским занятиям;
- подготовка к зачету;
- методические указания по выполнению индивидуального задания «Диффузия в границах зерен»;

Дисциплина относится к точным наукам и требует значительного объема самостоятельной работы. Отдельные учебные вопросы выносятся на самостоятельную проработку и контролируются посредством текущей аттестации. При этом организуются групповые и индивидуальные консультации. Качественное освоение дисциплины возможно только при систематической самостоятельной работе, что поддерживается системой текущей и рубежной аттестации.