

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Пекаревский Борис Владимирович  
Должность: Проректор по учебной и методической работе  
Дата подписания: 26.09.2023 17:14:12  
Уникальный программный ключ:  
3b89716a1076b80b2c167df0f27c09d01782ba84



**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Санкт-Петербургский государственный технологический институт  
(технический университет)»

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по учебной  
и методической работе  
\_\_\_\_\_ Б.В.Пекаревский  
«24» мая 2021 г.

**Рабочая программа дисциплины**  
**МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**  
**ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ**  
Направление подготовки  
**22.04.01 Материаловедение и технология материалов**  
Направленность программы магистратуры  
**Функциональные наноматериалы и покрытия для твердотельной электроники**

Квалификация

**Магистр**

Форма обучения

**Очная**

Факультет **Химии веществ и материалов**

Кафедра **Химической нанотехнологии и материалов электронной техники**

Санкт-Петербург

2021

## ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЯ

| Должность | Подпись | Ученое звание, фамилия, инициалы |
|-----------|---------|----------------------------------|
| Доцент    |         | доцент С.Д.Дубровенский          |
| Доцент    |         | Е.О. Дроздов                     |

Рабочая программа дисциплины «Моделирование и анализ технологических процессов твердотельной электроники» обсуждена на заседании кафедры химической нанотехнологии и материалов электронной техники  
протокол от 15.04.2021 № 9

Заведующий кафедрой ХНиМЭТ

профессор А.А. Малыгин

Одобрено учебно-методической комиссией факультета химии веществ и материалов  
протокол от 20.05. 2021 № 8

Председатель

доцент С.Г. Изотова

### СОГЛАСОВАНО

|   |  |                      |
|---|--|----------------------|
| Руководитель ООП<br>«Материаловедение и технологии<br>материалов» |  | доцент Н.В. Захарова |
| Директор библиотеки   |  | Т.Н. Старостенко     |
| Начальник методического отдела<br>учебно-методического управления |  | Т.И. Богданова       |
| Начальник УМУ   |  | С.Н. Денисенко       |

## СОДЕРЖАНИЕ

|  |    |
|--|----|
| 1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы..... | 04 |
| 2. Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы.....  | 05 |
| 3. Объем дисциплины .....  | 05 |
| 4. Содержание дисциплины .....   | 06 |
| 4.1. Разделы дисциплины и виды занятий.....  | 06 |
| 4.2. Формирование индикаторов достижения компетенций разделами дисциплины ....   | 06 |
| 4.3. Занятия лекционного типа .....  | 07 |
| 4.4. Занятия семинарского типа.....  | 08 |
| 4.4.1. Семинары, практические занятия .....  | 08 |
| 4.4.2. Лабораторные занятия .....  | 08 |
| 4.5. Самостоятельная работа.....   | 09 |
| 5. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине.....                                       | 10 |
| 6. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации .....  | 10 |
| 7. Перечень учебных изданий, необходимых для освоения дисциплины .....   | 10 |
| 8. Перечень электронных образовательных ресурсов, необходимых для освоения дисциплины.....   | 12 |
| 9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины .....  | 12 |
| 10. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине .....                         | 13 |
| 10.1. Информационные технологии .....  | 13 |
| 10.2. Программное обеспечение.....   | 13 |
| 10.3. Базы данных и информационные справочные системы .....  | 13 |
| 11. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине .....                                | 13 |
| 12. Особенности освоения дисциплины инвалидами и лицами с ограниченными возможностями здоровья .....   | 14 |
| Приложения: 1. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации .....  | 15 |

**1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы.**

Для освоения образовательной программы магистратуры обучающийся должен овладеть следующими результатами обучения по дисциплине:

| Код и наименование компетенции   | Код и наименование индикатора достижения компетенции  | Планируемые результаты обучения (дескрипторы)   |
|--|---|---|
| <p><b>ПК-3</b> Способен осуществлять анализ новых технологий производства материалов и разрабатывать рекомендации по составу и способам обработки конструкционных, инструментальных, композиционных и иных материалов с целью повышения их конкурентоспособности</p> | <p><b>ПК-3.4</b> Моделирование и прогнозирование свойств материалов и эффективности технологических процессов</p>                               | <p><b>Знать:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- основные принципы построения математических моделей физико-химических и технологических процессов планарной технологии (ЗН-1);</li> <li>- критерии и методы статистической оценки математических моделей (ЗН-2);</li> <li>- возможности использования компьютерных моделей для анализа и оптимизации технологических процессов планарной технологии (ЗН-3).</li> </ul> <p><b>Уметь:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- осуществлять системный анализ моделируемого процесса (У-1);</li> <li>- пользоваться методами и алгоритмами математического моделирования (У-2).</li> </ul> <p><b>Владеть:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- программным обеспечением для построения и анализа моделей (Н-1);</li> <li>- методами выбора и построения алгоритмов моделирования (Н-2);</li> <li>- математическим аппаратом обработки и анализа экспериментальных данных (Н-3).</li> </ul> |
| <p><b>ПК-4</b> Способен моделировать процессы обработок и прогнозировать результаты их осуществления при различных режимах, в том числе с использованием стандартных пакетов компьютерных программ и средств автоматизированного проектирования</p>                  | <p><b>ПК-4.3</b> Моделирование процессов обработки и прогнозирование результатов с использованием стандартных пакетов компьютерных программ</p> | <p><b>Знать:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- основные этапы технологии получения микро- и нано- элементов планарной технологии (ЗН-4);</li> <li>- механизмы взаимодействия полупроводниковых материалов с потоками высоко- и низкоэнергетических ионов и излучения, применяемых в планарной технологии (ЗН-5).</li> </ul> <p><b>Уметь:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- осуществить выбор оптимальных приемов получения низкоразмерных систем на поверхности полупроводниковых подложек (У-3).</li> </ul> <p><b>Владеть:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- приемами формирования низкоразмерных систем на поверхности твердых подложек (Н-4).</li> </ul>  |

## 2. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина «Моделирование и анализ технологических процессов твердотельной электроники» относится к части Блока 1 дисциплин (модулей) по выбору образовательной программы магистратуры, формируемой участниками образовательных отношений (Б1.В.06) и изучается на 2 году обучения в 4 семестре.

Изучение дисциплины базируется на знаниях и умениях, полученных при изучении курсов «Свойства и применение функциональных наноматериалов», «Процессы массопереноса в технологии высокотемпературных материалов», «Новые композиционные наноструктурированные материалы», «Физико-химические методы исследования твердых веществ в наноразмерном состоянии», а также «Технология функциональных пленочных наноматериалов» либо «Химия и технология электровакуумных и полупроводниковых материалов». Полученные в процессе освоения дисциплины «Моделирование и анализ технологических процессов твердотельной электроники» знания, умения и навыки могут быть использованы магистрантами при прохождении преддипломной практики, при подготовке, выполнении и защите магистерских диссертаций по тематике, связанной с разработкой и внедрением инновационных наукоемких процессов, материалов и технологий, созданием функциональных или конструкционных наноматериалов и разработкой нанотехнологических процессов, а также при решении научно-исследовательских, проектно-конструкторских, производственно-технологических и организационно-управленческих задач в будущей профессиональной деятельности.

## 3. Объем дисциплины

| Вид учебной работы  | Всего,<br>академических часов |
|---|-------------------------------|
|   | Очная форма обучения          |
| <b>Общая трудоемкость дисциплины</b><br>(зачетных единиц / академических часов) | <b>6 / 216</b>                |
| <b>Контактная работа с преподавателем:</b>                                      | <b>120</b>                    |
| занятия лекционного типа  | 36                            |
| занятия семинарского типа, в т.ч.   | 72                            |
| семинары, практические занятия (в том числе практическая подготовка)            | 36 (12)                       |
| лабораторные работы (в том числе практическая подготовка)                       | 36 (12)                       |
| курсовое проектирование (КР или КП)   | —                             |
| КСР   | 12                            |
| другие виды контактной работы   | —                             |
| <b>Самостоятельная работа</b>   | <b>96</b>                     |
| <b>Формы текущего контроля</b>  | —                             |
| <b>Форма промежуточной аттестации</b>   | <b>Зачет</b>                  |

#### 4. Содержание дисциплины

##### 4.1. Разделы дисциплины и виды занятий

| № п/п        | Наименование раздела дисциплины   | Занятия лекционного типа, акад. часы | Занятия семинарского типа, акад. часы |                     | Самостоятельная работа, акад. часы | Формируемые компетенции |
|--------------|---|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------|------------------------------------|-------------------------|
|              |   |                                      | Семинары и/или практические занятия   | Лабораторные работы |                                    |                         |
| 1            | Общие сведения о моделировании как о подходе к изучению процессов и явлений | 2                                    |                                       |                     | 32                                 | ПК-4                    |
| 2            | Элементы теории вероятностей и математической статистики                    | 6                                    |                                       |                     | 32                                 | ПК-4                    |
| 3            | Статистическое моделирование  | 6                                    | 16                                    |                     |                                    | ПК-4                    |
| 4            | Нелинейное моделирование  | 6                                    |                                       |                     | 32                                 | ПК-4                    |
| 5            | Стохастические методы поиска минимума нелинейных функций                    | 6                                    |                                       | 16                  |                                    | ПК-4                    |
| 6            | Термодинамическое прогнозирование состава сложных систем                    | 6                                    |                                       | 20                  |                                    | ПК-3                    |
| 7            | Моделирование диффузионных процессов в твердых телах                        | 4                                    | 20                                    |                     |                                    | ПК-3                    |
| <b>ИТОГО</b> |   | <b>36</b>                            | <b>36</b>                             | <b>36</b>           | <b>96</b>                          |                         |

##### 4.2 Формирование индикаторов достижения компетенций разделами дисциплины

| № п/п | Код индикаторов достижения компетенции | Наименование раздела дисциплины  |
|-------|--|--|
| 1     | ПК-3.4                                 | Общие сведения о моделировании как о подходе к изучению процессов и явлений<br>Элементы теории вероятностей и математической статистики.<br>Статистическое моделирование<br>Нелинейное моделирование<br>Стохастические методы поиска минимума нелинейных функций |
| 2     | ПК-4.3                                 | Термодинамическое прогнозирование состава сложных систем<br>Моделирование диффузионных процессов в твердых телах   |

#### 4.3. Занятия лекционного типа.

| № раздела дисциплины | Наименование темы и краткое содержание занятия  | Объем, акад. часы | Инновационная форма |
|----------------------|---|-------------------|---------------------|
| 1                    | <p><b>Общие сведения о моделировании как о подходе к изучению процессов и явлений</b></p> <p>Понятие модели. Оценка адекватности модели. Классификация моделей. Примеры модельных систем. Задачи, решаемые с помощью моделирования. Последовательность создания моделей. Программное обеспечение для математического моделирования.</p>   | 2                 | Лекция-беседа       |
| 2                    | <p><b>Элементы теории вероятностей и математической статистики.</b></p> <p>Случайные величины и случайные процессы. Непрерывные и дискретные случайные величины. Распределение случайных величин. Одномерные и многомерные случайные величины. Совместная функция распределения нескольких случайных величин. Ковариационная матрица. Автокорреляционная функция случайного процесса.</p>   | 6                 | Лекция-беседа       |
| 3                    | <p><b>Статистическое моделирование</b></p> <p>Линейные и нелинейные модели. Оценка дисперсии. Линейная регрессия. Метод наименьших квадратов. Обобщенная линейная регрессия. Число обусловленности. Элементы теории планирования эксперимента. Планирование эксперимента. Факторный план. Определение незначимых факторов. Алгоритм оценки адекватности модели. Дисперсионный анализ. Корреляционный анализ. Проверка функции распределения. Оценка качества моделей Метод моментов. Обобщающий коэффициент корреляции. Парные коэффициенты корреляции.</p> | 6                 | Лекция-беседа       |
| 4                    | <p><b>Нелинейное моделирование</b></p> <p>Задача нелинейного моделирования. Поиск минимума функции нескольких переменных. Условие минимума функции. Матрица Гессе. Корректность задачи по Адамару. Алгоритмы поиска минимума. Градиентные алгоритмы поиска минимума: наискорейший спуск, сопряженные градиенты, метод Ньютона. Квазиньютоновские алгоритмы.</p>   | 6                 | Лекция-беседа       |

| № раздела дисциплины | Наименование темы и краткое содержание занятия  | Объем, акад. часы | Инновационная форма |
|----------------------|---|-------------------|---------------------|
| 5                    | <b>Стохастические методы поиска минимума нелинейных функций</b><br>Генераторы случайных чисел. Метод Монте-Карло. Комплекс-метод Нелдера-Мида-Бокса. Метод имитации отжига.   | 6                 | Лекция-беседа       |
| 6                    | <b>Термодинамическое прогнозирование состава сложных систем</b><br>Феноменологические модели: химическая кинетика, химическая термодинамика. Правило фаз Гиббса. Метод поиска экстремумов характеристических функций. | 6                 | Лекция-беседа       |
| 7                    | <b>Моделирование диффузионных процессов в твердых телах</b><br>Анализ компонентов, входящих в систему, и процессов, происходящих при диффузионном легировании полупроводников. Выбор допущений. Формализация задачи.  | 4                 | Лекция-беседа       |

#### 4.4. Занятия семинарского типа

##### 4.4.1. Семинары, практические занятия

| № раздела дисциплины | Наименование темы и краткое содержание занятия   | Объем, акад. часы |                                   | Инновационная форма  |
|----------------------|--|-------------------|-----------------------------------|--|
|                      |  | всего             | в т.ч. на практическую подготовку |  |
| 3                    | <b>Статистическое моделирование</b><br>Использование модели линейной регрессии для определения характеристик процесса химической сборки ванадийоксидных структур на поверхности кремнезема | 16                | 6                                 | Компьютерное моделирование и практический анализ результатов |
| 7                    | <b>Моделирование диффузионных процессов в твердых телах</b><br>Моделирование процесса диффузионного легирования полупроводников на стадиях загонки и разгонки.                             | 20                | 6                                 | Компьютерное моделирование и практический анализ результатов |

##### 4.4.2. Лабораторные занятия

| № раздела дисциплины | Наименование темы и краткое содержание занятия  | Объем, акад. часы |                                   | Примечания |
|----------------------|---|-------------------|-----------------------------------|------------|
|                      |   | всего             | в т.ч. на практическую подготовку |            |
| 5                    | <b>Стохастические методы поиска минимума нелинейных функций</b><br>Релаксация структурных моделей | 16                | 6                                 |            |



|   |   |    |   |  |
|---|---|----|---|--|
|   | методом Монте-Карло   |    |   |  |
| 6 | <b>Термодинамическое прогнозирование состава сложных систем</b><br>Оценка величин термодинамических потенциалов и их зависимости от температуры на основе данных моделирования. Численный прогноз равновесного состава и его устойчивость. Подбор оптимальной температуры и давления в системе для обеспечения полноты протекания требуемых химических превращений. | 20 | 6 |  |

#### 4.5. Самостоятельная работа обучающихся

| № раздела дисциплины | Перечень вопросов для самостоятельного изучения  | Объем, акад. часы | Форма контроля |
|----------------------|--|-------------------|----------------|
| 2                    | <b>Общие сведения о моделировании как о подходе к изучению процессов и явлений</b><br>Цели построения моделей. Свойства моделей. Формы представления модели. Моделирование. Классификация моделирования. Классификация моделей. Математическая модель. Этапы построения математической модели. Подходы к построению математических моделей. Вычислительный эксперимент. Имитационное моделирование.  | 32                | Зачет          |
| 3                    | <b>Элементы теории вероятностей и математической статистики</b><br>Элементарная теория вероятностей: случайные события. Вероятностная модель эксперимента. Вероятностные пространства. Независимые события. Случайные величины. Математическое ожидание. Дисперсия. Закон больших чисел. Теорема Пуассона. Локальная теорема Муавра–Лапласа. Интегральная теорема Муавра–Лапласа. Совместное распределение. Моменты случайной величины. Характеристические функции случайных величин | 32                | Зачет          |
| 5                    | <b>Нелинейное моделирование</b><br>Понятие динамической системы. Классификация динамических систем. Модели на основе системы дифференциальных уравнений. Особенности математического моделирования нелинейных систем. Задача Коши и периодические решения. Устойчивость решений. Циклические процессы. Квазилинейные динамические системы. Синхронизация в нелинейных динамических системах. Детерминированный хаос.   | 32                | Зачет          |

## **5. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине.**

1. Дубровенский, С.Д. Квантово-химический анализ продуктов химического модифицирования поверхности кремнезема: методические указания к лабораторным работам / С.Д.Дубровенский.- СПб.: СПбГТИ(ТУ), 2011.– 60 с. (ЭБ)

2. Дубровенский, С.Д. Компьютерное моделирование процессов и оборудования субмикронной технологии : Учебное пособие / С. Д. Дубровенский, А. А. Малыгин. - СПб. : СПбГТИ (ТУ), 1997. - 102 с.

3. Чернышев, С.Л. Моделирование и классификация наноструктур / С.Л.Чернышев.- Москва: Книжный дом "ЛИБРОКОМ", 2011.- 210 с. - ISBN 978-5-397-01466-3

4. Чистякова, Т.Б. Компьютерные технологии моделирования процессов получения высокотемпературных наноструктурированных материалов : учебное пособие / Т. Б. Чистякова, А.Н. Полосин, И.В. Новожилова, Л.В. Гольцева. - СПб. : СПбГТИ (ТУ), 2013. - 223 с.

Методические указания для обучающихся по организации самостоятельной работы по дисциплине, включая перечень тем самостоятельной работы, формы текущего контроля по дисциплине и требования к их выполнению размещены в электронной информационно-образовательной среде СПбГТИ(ТУ) на сайте: <http://media.technolog.edu.ru>

## **6. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации.**

Своевременное выполнение обучающимся мероприятий текущего контроля позволяет превысить (достигнуть) пороговый уровень («удовлетворительно») освоения предусмотренных элементов компетенций. Результаты дисциплины считаются достигнутыми, если для всех элементов компетенций превышен (достигнут) пороговый уровень освоения компетенции на данном этапе.

Промежуточная аттестация по дисциплине — в конце 2 семестра в виде защиты курсового проекта и зачета в устной форме. К сдаче зачета допускаются студенты, выполнившие все формы текущего контроля. Зачет предусматривает выборочную проверку освоения предусмотренных элементов компетенций и включает 2 вопроса из различных тем пройденного материала. Время подготовки студента к устному ответу — до 30 мин.

Результаты зачета включаются в приложение к диплому.

Фонд оценочных средств по дисциплине представлен в Приложении № 1.

Примеры вопросов, предлагаемых на экзамене:

1. Понятие о численных методах решения уравнений.
2. Линейная регрессия. Метод наименьших квадратов.

## **7. Перечень учебных изданий, необходимых для освоения дисциплины**

### **а) печатные издания:**

1. Бутырская, Е.В. Компьютерная химия: основы теории и работа с программами Gaussian и Gauss View / Е.В.Бутырская.- Москва: СОЛОН-Пресс, 2011.- 218 с. - ISBN 978-5-91359-095-4

2. Дубровенский, С.Д. Квантово-химический анализ продуктов химического модифицирования поверхности кремнезема: методические указания к лабораторным работам / С.Д.Дубровенский; Министерство образования и науки Российской Федерации, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Кафедра химической нанотехнологии и материалов электронной техники. – Санкт-Петербург: СПбГТИ(ТУ), 2011. - 57 с.

3. Чернышев, С.Л. Моделирование и классификация наноструктур / С.Л.Чернышев.- Москва: Книжный дом "ЛИБРОКОМ", 2011.- 210 с. - ISBN 978-5-397-01466-3

- 4 Холоднов, В.А. Компьютерные технологии построения математических моделей химико-технологических процессов на основе полного факторного эксперимента : Учебное пособие / В. А. Холоднов, В. М. Крылов, В. П. Андреева, В.Н. Чепикова, Л.С. Кирьянова; Министерство образования и науки Российской Федерации, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Кафедра математического моделирования и оптимизации химико-технологических процессов. – Санкт-Петербург: СПбГТИ (ТУ), 2010. - 53 с.
5. Дубровенский, С.Д. Компьютерное моделирование процессов и оборудования субмикронной технологии : Учебное пособие / С. Д. Дубровенский, А. А. Малыгин. – Санкт-Петербург : СПбГТИ (ТУ), 1997. - 102 с.

**б) электронные издания:**

1. Дубровенский, С.Д. Квантово-химический анализ продуктов химического модифицирования поверхности кремнезема: методические указания к лабораторным работам / С.Д.Дубровенский; Министерство образования и науки Российской Федерации, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Кафедра химической нанотехнологии и материалов электронной техники. – Санкт-Петербург: СПбГТИ(ТУ), 2011. - 57 с. // СПбГТИ(ТУ). Электронная библиотека. - URL: <https://technolog.bibliotech.ru> (дата обращения: 15.12.2020). - Режим доступа: для зарегистрированных пользователей.
2. Дубровенский, С.Д. Компьютерный дизайн и визуализация молекулярных объектов : Практикум / С. Д. Дубровенский; Министерство образования и науки Российской Федерации, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Кафедра химической нанотехнологии и материалов электронной техники. – Санкт-Петербург: СПбГТИ(ТУ), 2016. - 16 с. // СПбГТИ(ТУ). Электронная библиотека. - URL: <https://technolog.bibliotech.ru> (дата обращения: 15.12.2020). - Режим доступа: для зарегистрированных пользователей.
3. Ермаков, А.И. Начальный курс квантовой механики и квантовой химии: учебное пособие для вузов / А.И. Ермаков.- Электрон. текстовые дан. - Москва: Юрайт, 2010.- 555 с. – ISBN 978-5-9916-0587-8 (Юрайт). – ISBN 978-5-9692-0331-0 (ИД Юрайт) // СПбГТИ(ТУ). Электронная библиотека. - URL: <https://technolog.bibliotech.ru> (дата обращения: 15.12.2020). - Режим доступа: для зарегистрированных пользователей.
4. Чистякова, Т.Б. Компьютерные технологии моделирования процессов получения высокотемпературных наноструктурированных материалов : учебное пособие / Т. Б. Чистякова, А.Н. Полосин, И.В. Новожилова, Л.В. Гольцева; Министерство образования и науки Российской Федерации, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Кафедра систем автоматизированного проектирования и управления – Санкт-Петербург: СПбГТИ (ТУ), 2013. - 223 с. // СПбГТИ (ТУ). Электронная библиотека. - URL: <https://technolog.bibliotech.ru> (дата обращения: 15.12.2020). - Режим доступа: для зарегистрированных пользователей.
5. Дубровенский, С.Д. Компьютерный анализ спектральных данных / С.Д.Дубровенский; Министерство образования и науки Российской Федерации, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Кафедра химической нанотехнологии и материалов электронной техники. - Санкт-Петербург: СПбГТИ(ТУ), 2011. – 49 с. // СПбГТИ(ТУ). Электронная библиотека. - URL: <https://technolog.bibliotech.ru> (дата обращения: 15.12.2020). - Режим доступа: для зарегистрированных пользователей.
6. Гартман, Т.Н. Моделирование химико-технологических процессов. Принципы применения пакетов компьютерной математики : Учебное пособие для вузов по направлению подготовки "Химическая технология" / Т. Н. Гартман, Д. В. Клушин. - Санкт-Петербург : Лань, 2020. - 404 с. ISBN 978-5-8114-3900-3 : // Лань : электронно-библиотечная система. - URL: <https://e.lanbook.com> (дата обращения: 01.11.2019). - Режим доступа: по подписке.

## **8. Перечень электронных образовательных ресурсов, необходимых для освоения дисциплины**

1. Учебный план, РПД и учебно-методические материалы - [media.technolog.edu.ru](http://media.technolog.edu.ru)
2. ЭБ "Библиотех" СПбГТИ(ТУ) (доступ к сайту библиотеки);
3. Информационно-справочные поисковые системы и БД в сети Интернет;
4. Электронная библиотека - <http://elibrary.ru>.
3. Программный пакет MathCAD
4. Программный пакет MS EXCEL
5. Программный пакет GAMESS
6. Программный пакет GAUSSIAN

## **9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины**

Все виды занятий по дисциплине проводятся в соответствии с требованиями следующих СТП:

1. СТО СПбГТИ(ТУ) 039-2013. Магистратура. Общие требования./ СПбГТИ(ТУ).- Введ. с 01.01.2013.- СПб.: СПбГТИ(ТУ), 2013.- 25 с.
2. СТП СПбГТИ(ТУ) 040-02. Виды учебных занятий. Лекция. Общие требования./ СПбГТИ(ТУ).- Введ. с 01.07.2002.- СПб.: СПбГТИ(ТУ), 2002.- 7 с.
3. СТП СПбГТИ(ТУ) 020-2011. Виды учебных занятий. Лабораторные работы. Общие требования к организации и проведению занятий. / СПбГТИ(ТУ).- Введ. с 01.07.2011.- СПб.: СПбГТИ(ТУ), 2011.- 21 с.
4. СТО СПбГТИ(ТУ) 018-2014. Виды учебных занятий. Семинары и практические занятия. Общие требования к организации и проведению./ СПбГТИ(ТУ).- СПб.: СПбГТИ(ТУ), 2014.- 16 с
5. СТП СПбГТИ(ТУ) 048-2009. Виды учебных занятий. Самостоятельная планируемая работа студентов. Общие требования к организации и проведению./ СПбГТИ(ТУ).- Введ. с 01.01.2010.- СПб.: СПбГТИ(ТУ), 2009.- 6 с.
6. СТО СПбГТИ(ТУ) 016-2015. Порядок организации и проведения зачётов и экзаменов./ СПбГТИ(ТУ).- Введ. с 01.06.2015. - СПб.: СПбГТИ(ТУ), 2015.- 45 с.

В ходе лекционных занятий студенту необходимо готовить конспект лекций: кратко, схематично, последовательно фиксировать основные положения, выводы, формулировки, обобщения; помечать важные мысли, выделять ключевые слова, термины. Провести проверку терминов, понятий с помощью энциклопедий, словарей, справочников с выписыванием толкований в тетрадь.

Аудиторная часть курса должна сопровождаться интенсивной самостоятельной работой студентов с рекомендованными преподавателями литературными источниками и информационными ресурсами сети Интернет по всем разделам дисциплины. Планирование времени для изучения дисциплины необходимо осуществлять на весь период обучения, предусматривая при этом регулярное повторение пройденного материала. Материал, законспектированный на лекциях, необходимо в рамках внеаудиторной самостоятельной работы регулярно дополнять сведениями из литературных источников, приведенных в разделе 7 настоящей программы. При этом на основе изучения рекомендованной литературы целесообразно составить конспект основных положений, терминов и определений, требующих запоминания и необходимых для освоения следующих разделов учебной дисциплины. Для расширения и углубления знаний по учебной дисциплине необходимо активно использовать информационные ресурсы сети Интернет.

Для выполнения лабораторных работ необходимы: проработка рабочей программы с уделением особого внимания целям и задачам, структуре и содержанию дисциплины, и конспектирование источников, а также изучение конспекта лекций, подготовка ответов к контрольным вопросам и просмотр рекомендуемой литературы.

Для работы на практических занятиях необходимы: проработка рабочей программы,

уделив особое внимание целям и задачам структуре и содержанию дисциплины, и конспектирование источников, а также изучение конспекта лекций, подготовка ответов к контрольным вопросам и просмотр рекомендуемой литературы.

Промежуточная аттестация по дисциплине — в конце 4 семестра в виде зачета в устной форме. К сдаче зачета допускаются студенты, выполнившие все формы текущего контроля. Зачет предусматривает выборочную проверку освоения предусмотренных элементов компетенций и включает 2 вопроса из различных тем пройденного материала. Время подготовки студента к устному ответу — до 30 мин.

Результаты зачета включаются в приложение к диплому.

## **10. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.**

### **10.1. Информационные технологии.**

В учебном процессе по данной дисциплине предусмотрено использование информационных технологий:

- чтение лекций с использованием слайд-презентаций, видеоматериалов, виртуальных лабораторий и баз данных;
- взаимодействие с обучающимися посредством ЭИОС.

### **10.2. Программное обеспечение.**

Представление лекционного материала

ОС – не ниже MS Windows XP SP3

MS PowerPoint 97 и выше

Проведение лабораторного практикума:

ОС – не ниже MS Windows XP SP3

MS EXCEL 97 и выше

Программный пакет MathCAD

Программные пакеты MathCAD, MS EXCEL, GAMESS, GAUSSIAN

### **10.3. Базы данных и информационные справочные системы**

1. ЭБ "Библиотех" СПбГТИ(ТУ) (доступ к сайту библиотеки);
2. Информационно-справочные поисковые системы и БД в сети Интернет; ЭБС «Лань»
3. Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU <http://elibrary.ru>

## **11. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине**

Реализация программы учебной дисциплины не предполагает наличия специализированного учебного кабинета при условии соответствия учебных кабинетов санитарным нормам, а его оборудования – изложенным ниже требованиям:

1. Учебная аудитория на 10 и более мест
2. Персональный компьютер.
3. Мультимедиа-проектор (разрешение не хуже 1024×758).
4. Стационарный или переносной проекционный экран.
5. Комплект презентаций и видеофильмов по дисциплине.

Лабораторные занятия проводятся в учебном кабинете, отвечающем санитарным нормам, а его оборудование – следующим требованиям:

1. Компьютерный класс на 25 и более мест, включающий не менее 6 персональных компьютеров с подключением к сети Internet
2. Персональный компьютер преподавателя.
3. Мультимедиа-проектор (разрешение не хуже 1024×758).

4. Стационарный или переносной проекционный экран.

**12. Особенности освоения дисциплины инвалидами и лицами с ограниченными возможностями здоровья.**

Инвалиды и лица с ограниченными возможностями здоровья, допущенные по медицинским показаниям к обучению по направлению подготовки 22.04.01 Материаловедение и технологии материалов, изучают дисциплину в полном объеме. Учебный процесс осуществляется в соответствии с «Положением об организации учебного процесса для обучения инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья ФГБОУ ВПО СПбГТИ(ТУ)», утвержденным ректором 28.08.2014.

**Фонд оценочных средств  
для проведения промежуточной аттестации по дисциплине  
«Моделирование и анализ технологических процессов твердотельной электроники»**

**1. Перечень компетенций и этапов их формирования.**

| <b>Индекс компетенции</b> | <b>Содержание</b>   | <b>Этап формирования</b> |
|---------------------------|---|--------------------------|
| <b>ПК-3</b>               | Способен осуществлять анализ новых технологий производства материалов и разрабатывать рекомендации по составу и способам обработки конструкционных, инструментальных, композиционных и иных материалов с целью повышения их конкурентоспособности | промежуточный            |
| <b>ПК-4</b>               | Способен моделировать процессы обработок и прогнозировать результаты их осуществления при различных режимах, в том числе с использованием стандартных пакетов компьютерных программ и средств автоматизированного проектирования                  | промежуточный            |

## 2. Показатели и критерии оценивания компетенций на различных этапах их формирования, шкала оценивания

| Код и наименование индикатора достижения компетенции  | Показатели сформированности (дескрипторы)  | Критерий оценивания                           | Уровни сформированности (описание выраженности дескрипторов)   |   |
|---|--|---|--|---|
|   |  |   | «не зачтено»   | «зачтено»   |
| <b>ПК-3.4</b><br>Моделирование и прогнозирование свойств материалов и эффективности технологических процессов | Знает основные принципы построения математических моделей физико-химических и технологических процессов планарной технологии (ЗН-1)  | Правильные ответы на вопросы №№ 1-2 к зачету  | Не знает основные принципы построения математических моделей физико-химических и технологических процессов планарной технологии  | Знает основные принципы построения математических моделей физико-химических и технологических процессов планарной технологии  |
|   | Знает критерии и методы статистической оценки математических моделей (ЗН-2)  | Правильные ответы на вопросы №№ 3-4 к зачету  | Не знает критерии и методы статистической оценки математических моделей  | Знает критерии и методы статистической оценки математических моделей  |
|   | Знает возможности использования компьютерных моделей для анализа и оптимизации технологических процессов планарной технологии (ЗН-3) | Правильные ответы на вопросы №№ 5-6 к зачету  | Не знает возможности использования компьютерных моделей для анализа и оптимизации технологических процессов планарной технологии | Знает возможности использования компьютерных моделей для анализа и оптимизации технологических процессов планарной технологии |
|   | Умеет осуществлять системный анализ моделируемого процесса; У-1)   | Правильные ответы на вопросы №№ 7-8 к зачету  | Не умеет осуществлять системный анализ моделируемого процесса  | Умеет осуществлять системный анализ моделируемого процесса  |
|   | Умеет пользоваться методами и алгоритмами математического моделирования (У-2)  | Правильные ответы на вопросы №№ 9-10 к зачету | Не умеет пользоваться методами и алгоритмами математического моделирования   | Умеет пользоваться методами и алгоритмами математического моделирования   |



| Код и наименование индикатора достижения компетенции   | Показатели сформированности (дескрипторы)   | Критерий оценивания                            | Уровни сформированности (описание выраженности дескрипторов)  |   |
|--|---|--|---|---|
|  |   |  | «не зачтено»  | «зачтено»   |
|  | Владеет программным обеспечением для построения и анализа моделей (Н-1)   | Правильные ответы на вопрос № 11 к зачету      | Не владеет программным обеспечением для построения и анализа моделей  | Владеет программным обеспечением для построения и анализа моделей   |
|  | Владеет методами выбора и построения алгоритмов моделирования (Н-2)   | Правильные ответы на вопрос № 12 к зачету      | Не владеет методами выбора и построения алгоритмов моделирования  | Владеет методами выбора и построения алгоритмов моделирования   |
|  | Владеет математическим аппаратом обработки и анализа экспериментальных данных (Н-3).  | Правильные ответы на вопрос № 13 к зачету      | Не владеет математическим аппаратом обработки и анализа экспериментальных данных  | Владеет математическим аппаратом обработки и анализа экспериментальных данных   |
| <b>ПК-4.3</b><br>Моделирование процессов обработки и прогнозирования результатов с использованием стандартных пакетов компьютерных | Знает основные этапы технологии получения микро- и нано- элементов планарной технологии (ЗН-4);   | Правильные ответы на вопросы №№ 14-21 к зачету | Не знает основные этапы технологии получения микро- и нано- элементов планарной технологии (ЗН-4)   | Знает основные этапы технологии получения микро- и нано- элементов планарной технологии   |
|  | Знает механизмы взаимодействия полупроводниковых материалов с потоками высоко- и низкоэнергетических ионов и излучения, применяемых в планарной технологии (ЗН-5) | Правильные ответы на вопросы №№ 22-24 к зачету | Не знает механизмы взаимодействия полупроводниковых материалов с потоками высоко- и низкоэнергетических ионов и излучения, применяемых в планарной технологии | Знает механизмы взаимодействия полупроводниковых материалов с потоками высоко- и низкоэнергетических ионов и излучения, применяемых в планарной технологии матриц |

| Код и наименование индикатора достижения компетенции программ | Показатели сформированности (дескрипторы)  | Критерий оценивания                            | Уровни сформированности (описание выраженности дескрипторов)   |   |
|---|--|--|--|---|
|   |  |  | «не зачтено»   | «зачтено»   |
|   | Умеет осуществить выбор оптимальных приемов получения низкоразмерных систем на поверхности полупроводниковых подложек (У-2). | Правильные ответы на вопросы №№ 25-29 к зачету | Не умеет осуществить выбор оптимальных приемов получения низкоразмерных систем на поверхности полупроводниковых подложек | Умеет осуществить выбор оптимальных приемов получения низкоразмерных систем на поверхности полупроводниковых подложек |
|   | Владеет приемами формирования низкоразмерных систем на поверхности твердых подложек (Н-4).                                   | Правильные ответы на вопросы №№ 30-35 к зачету | Не владеет приемами формирования низкоразмерных систем на поверхности твердых подложек                                   | Владеет приемами формирования низкоразмерных систем на поверхности твердых подложек                                   |

Шкала оценивания соответствует СТО СПбГТИ (ТУ): промежуточная аттестация проводится в форме **зачета** в устной форме. Критерии оценивания – «**зачтено**», «**не зачтено**» приведены в таблице 2.

Оценка «зачтено» выставляется, если ответ студента отличается последовательностью, логикой изложения, учащийся демонстрирует глубину владения представленным материалом, ответы формулируются аргументировано, обосновывается собственная позиция в проблемных ситуациях.

Оценка «не зачтено» ставится, если ответ студента не передает содержание проблемы, не демонстрирует умение выделять главное, существенное, ответ носит краткий, неглубокий, поверхностный характер.

### **3. Типовые контрольные задания для проведения промежуточной аттестации**

#### **а) Вопросы для оценки знаний, умений и навыков, сформированных у студента по компетенции ПК-3**

1. Термодинамическое прогнозирование превращений веществ и материалов в равновесных гетерофазных системах.
2. Методика расчета равновесного превращения через константу равновесия процесса.
3. Расчет равновесия химического превращения.
4. Понятие о численных методах решения уравнений.
5. Оценка степени равновесного превращения.
6. Принципы моделирования химико-технологических процессов.
7. Методика выбора оптимальных условий синтеза материалов электронной техники.
8. Задача расчета равновесного состава и ее математическая формулировка.
9. Моделирование равновесного состава в многокомпонентных гомогенных системах.
10. Прогноз равновесного состава в закрытых химических системах Метод экстремумов характеристических функций (МЭХФ).
11. Описание диффузии в твердых телах. Коэффициент диффузии. Закон Фика.
12. Процесс диффузии легирующих добавок в полупроводники. Основные расчетные формулы.
13. Анализ компонентов, входящих в систему, и процессов, происходящих при диффузионном легировании полупроводников. Выбор допущений. Формализация задачи.

#### **б) Вопросы для оценки знаний, умений и навыков, сформированных у студента по компетенции ПК-4**

14. Цели построения моделей. Свойства моделей. Формы представления модели. Моделирование. Классификация моделирования.
15. Классификация моделей. Математическая модель. Этапы построения математической модели.
16. Подходы к построению математических моделей. Вычислительный эксперимент. Имитационное моделирование
17. Примеры модельных систем. Задачи, решаемые с помощью моделирования.
18. Последовательность создания моделей. Программное обеспечение для математического моделирования.
19. Элементарная теория вероятностей: случайные события. Вероятностная модель эксперимента
20. Вероятностные пространства. Независимые события.
21. Случайные величины. Математическое ожидание. Дисперсия.
22. Закон больших чисел. Теорема Пуассона. Локальная теорема Муавра–Лапласа. Интегральная теорема Муавра–Лапласа.

23. Совместное распределение. Моменты случайной величины. Характеристические функции случайных величин
24. Случайные величины и случайные процессы. Непрерывные и дискретные случайные величины.
25. Одномерные и многомерные случайные величины. Совместная функция распределения нескольких случайных величин. Ковариационная матрица. Автокорреляционная функция случайного процесса
26. Линейные и нелинейные модели. Оценка дисперсии.
27. Линейная регрессия. Метод наименьших квадратов.
28. Обобщенная линейная регрессия. Число обусловленности.
29. Элементы теории планирования эксперимента. Факторный план. Определение незначимых факторов.
30. Алгоритм оценки адекватности модели. Дисперсионный анализ. Корреляционный анализ. Проверка функции распределения.
31. Оценка качества моделей Метод моментов. Обобщающий коэффициент корреляции. Парные коэффициенты корреляции.
32. Задача нелинейного моделирования. Поиск минимума функции нескольких переменных.
33. Условие минимума функции. Матрица Гессе.
34. Корректность задачи по Адамару.
35. Алгоритмы поиска минимума. Градиентные алгоритмы поиска минимума: наискорейший спуск, сопряженные градиенты, метод Ньютона.
36. Квазиньютоновские алгоритмы.
33. Генераторы случайных чисел. Метод Монте-Карло.
34. Комплекс-метод Нелдера-Мида-Бокса.
35. Метод имитации отжига.

К зачету допускаются студенты, выполнившие все формы текущего контроля. При сдаче зачета студент получает 2 вопроса из перечня, приведенного выше.

Время подготовки студента к устному ответу на вопросы — до 30 мин.

**4. Методические материалы для определения процедур оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций.**

1. Положение о формах, периодичности и порядке проведения текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся в СПбГТИ(ТУ) (Утв. Приказом ректора СПбГТИ(ТУ) от 12.12.2014 № 463).

2. СТО СПбГТИ(ТУ) 039-2013. Магистратура. Общие требования./ СПбГТИ(ТУ).- Введ. с 01.01.2013.- СПб.: СПбГТИ(ТУ), 2013.- 25 с.

3. СТО СПбГТИ(ТУ) 016-2015. Порядок организации и проведения зачётов и экзаменов./ СПбГТИ(ТУ).- Введ. с 01.06.2015. - СПб.: СПбГТИ(ТУ), 2015.- 45 с.