

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт электрофизики  
Уральского отделения Российской академии наук  
(ИЭФ УрО РАН)

«Утверждаю»  
Директор ИЭФ УрО РАН

\_\_\_\_\_  
С.А. Чайковский  
«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**  
**«Нано- и гетероструктуры. Создание материалов и применение в**  
**современной технике.»**  
**Б1.Э.2-2**

для обучающихся по образовательным программам высшего образования –  
программам подготовки научных и научно-педагогических кадров в  
аспирантуре ИЭФ УрО РАН

Специальность 03.06.01 – «Физика и астрономия»

Екатеринбург  
2022

Программу составили:

с.н.с. ИЭФ УрО РАН

к.х.н.

Калинина Е.Г.

СОГЛАСОВАНО:

Зам. директора по НР ИЭФ УрО РАН

д.ф.-м.н.

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 г.

Болтачев Г.Ш.

Учёный секретарь ИЭФ УрО РАН

к.ф.-м.н.

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 г.

Кокорина Е.Е.

Рабочая программа утверждена на заседании Учёного совета ИЭФ УрО РАН.  
Протокол № 4 от 29.06.2022 г.

Программа составлена с учётом Положения о подготовке научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре), утвержденной Постановлением Правительства РФ № 2122 от 30 ноября 2021 г. и на основе Федеральных государственных требований к структуре программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре, утверждённых приказом Министерства науки и высшего образования РФ № 951 от 20.10.2021 г. (зарегистрирован Министерством юстиции РФ 23.11.2021 г., регистрационный № 65943).

## **1. Цели и задачи дисциплины.**

– дать общее представление о физико-химических процессах в нанообъектах и функциональных материалах на их основе, технологиях в микроэлектронике на основе нано- и гетероструктур, а также тонких пленок. Ознакомить с основными физическими понятиями и эффектами диффузии в твердых телах и на межфазных границах, характерных для гетероструктур. Рассмотреть особенности физико-химических методов синтеза порошковых наноматериалов и керамической технологии, методов компактирования и консолидации порошков. Ознакомить с мембранными технологиями;

– научить аспирантов собирать, анализировать и систематизировать отечественную и зарубежную научно-техническую информацию по тематике исследования в области нано- и гетероструктур, получить навыки решения конкретных прикладных задач.

## **2. Требования к уровню освоения содержания дисциплины.**

В результате изучения дисциплины аспирант должен:

### **Знать:**

– фундаментальные законы природы и основные физические законы в области термодинамики, статистической физики, физики твердого тела;

– физические и физико-химические основы технологии изделий электроники и нанoeлектроники, особенности мембранных и пленочных технологий.

### **Уметь:**

– применять математические методы, физические и химические законы для решения практических задач;

– обеспечивать технологическую и конструктивную реализацию материалов и элементов электронной техники в приборах и устройствах электроники и нанoeлектроники, устройствах преобразования энергии и мембранных устройствах;

– использовать полученные знания для проведения научно-исследовательской работы по конкретной тематике и обосновывать полученные результаты, анализировать научные публикации по конкретной проблеме исследований, выявлять тенденции развития своего научного направления.

### **Владеть:**

– навыками практического применения законов физики, химии и экологии;

– новыми технологиями, обеспечивающими повышение эффективности проектов, технологических процессов, эксплуатации и обслуживания новой

техники в области электроники и нанoeлектроники, устройствах преобразования энергии и мембранных устройствах;

– навыками использования полученных знаний для проведения научно-исследовательской работы по конкретной тематике.

### 3. Объем дисциплины и виды учебной работы.

<i>Вид учебной работы</i>	<i>Всего</i>		<i>Период обучения</i>
	<i>часов</i>	<i>ЗЕТ</i>	
Общая трудоёмкость дисциплины	108	3	первый-третий курс
Аудиторные занятия, в т.ч.:			
Лекции	18	0,5	
Практические занятия (ПЗ)			
Самостоятельная работа	72	2	
Контроль самостоятельной работы	18	0,5	

### 4. Содержание дисциплины.

#### 4.1. Разделы дисциплин и виды занятий

<i>№ п/п</i>	<i>Раздел дисциплины</i>	<i>Лекции</i>	<i>ПЗ</i>	<i>Сам. раб.</i>	<i>Контр. сам. раб.</i>
1	Введение	2		8	2
2	Диффузия в твердых телах и на межфазовых границах в нано- и гетеросистемах	4		16	4
3	Диффузионные процессы и эффекты в микроэлектронике при формировании гетероструктур	3		12	3
4	Нано- и гетероструктуры	2		8	2
5	Физико-химические процессы получения и свойства функциональных твердофазных неорганических наноматериалов электронной техники. Элементы керамической технологии нанопорошков	4		16	4
6	Керамические наноструктурные мембраны	2		8	2

7	Заключение	1		4	1
Всего час.		18	-	72	18

## 4.2. Содержание разделов дисциплины

### 4.2.1. Введение

Цели и задачи курса, его связь с другими дисциплинами. Основные понятия и определения. Общая характеристика наноматериалов и нанотехнологий. Разновидности наноматериалов. Разновидности нанотехнологий. Области применения наноматериалов и нанотехнологий. История развития наноматериалов и нанотехнологий.

### 4.2.2. Диффузия в твердых телах и на межфазовых границах в нано- и гетеросистемах

Диффузия. Научное и практическое значение изучения диффузии. Основные виды диффузии. Феноменологическое описание процессов диффузии (Первый и Второй законы Фика). Второе уравнение Фика при наличии в системе дополнительной действующей силы. Виды коэффициентов диффузии. Взаимосвязь коэффициента диффузии с кристаллическим строением твердых тел. Температурная зависимость коэффициента диффузии. Закон Аррениуса. Энергия активации диффузии и ее определение.

Процессы диффузии на поверхности. Уравнения случайного блуждания. Анизотропия поверхностной диффузии. Ориентационная анизотропия. Анизотропия по направлениям. Атомные механизмы поверхностной диффузии. Кластеры. Поверхностная диффузия кластеров. Гетеродиффузия в присутствии атомов третьего элемента. Сурфактанты. Механизм Франка-Ван дер Мерве. Механизм Вольмера-Вебера. Механизм Странского-Крастанова. Поверхностная диффузия, сопровождающаяся формированием новой фазы. Механизм твёрдофазного растекания.

Объемная и зернограничная диффузия в твердом теле. Возможные механизмы диффузии в кристаллах. Зернограничная диффузия. Классификация кинетических режимов диффузии по границам зерен Харрисона. Модель Фишера зернограничной диффузии. Диффузия в «активных» или дефектных средах. Физико-химические процессы, протекающие при спекании порошковых материалов и керамики.

### **4.2.3. Диффузионные процессы и эффекты в микроэлектронике при формировании гетероструктур**

Формирование p-n переходов методом диффузии. Распределение примеси при диффузии. Термическое окисление. Ионная имплантация примесей. Тонкие пленки. Диффузионные методы нанесения покрытий.

### **4.2.4. Нано- и гетероструктуры**

Нано- и гетероструктуры с повышенной ионной проводимостью. Наноионика. Вертикально ориентированные нанокompозитные пленки, механизм и способы их формирования.

### **4.2.5. Физико-химические процессы получения и свойства функциональных твердофазных неорганических наноматериалов электронной техники. Элементы керамической технологии нанопорошков**

Классификация материалов. Материалы с электрическими функциями. Материалы с магнитными функциями. Материалы с оптическими функциями. Диэлектрические керамические материалы в электронной технике. Основной принцип технологии получения керамики. Общая схема изготовления керамического изделия.

Технология размол в лабораторных условиях (мельницы планетарного типа; дезинтеграторы; криодиспергирование) и в промышленности (турбомельницы; шаровые мельницы; вибромельницы; струйные мельницы). Методы формования керамики. Горячее литьё под давлением. Метод прессования. Магнитно-импульсный метод прессования. Сухое ультразвуковое квазирезонансное прессование. Технология литья пленок. Применение наноматериалов в керамической технологии.

### **4.2.6. Керамические наноструктурные мембраны**

Современные тенденции в производстве энергии. Общие особенности мембранных процессов и типы мембран. Определение и классификация мембран. Возможные варианты применения мембран. Мембранные реакторы. Кислородные мембраны. Различные принципы работы кислородной мембраны: смешанный ионно–электронный проводник, твердоэлектролитная ячейка (кислородный насос). Требования к материалам кислородной мембраны. Композитная двухфазная мембрана. Термодинамические условия конверсии метана в оксидном мембранном конвертере. Катализаторы парциального окисления метана. Проблемы поиска новых смешанных проводников для керамических мембран.

#### **4.2.7. Заключение**

Перспективы развития технологии нано- и гетероструктур, а также создания перспективных функциональных материалов и устройств электронной техники и преобразования энергии. Проблемы, возможные пути развития.

#### **4.3. Самостоятельная работа аспирантов.**

4.3.1. Проработка лекционного материала по конспектам и учебной литературе (72 ч.).

4.3.2. Подготовка к контролю по дисциплине (18 ч.).

#### **5. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины.**

##### **5.1. Рекомендуемая литература.**

###### **а) основная литература:**

1. Котов, Ю.А. Импульсные технологии и наноматериалы. Избранные труды / Ю.А. Котов; отв. Ред. В.Г. Шпак. – Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2013. – 458 с.
2. Гусев, А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. Издание 2-е, исправленное. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 416 с.
3. Соковнин, С.Ю., Ильвес, В.Г. Применение импульсного электронного пучка для получения нанопорошков некоторых оксидов металлов / [Отв. ред. С.П. Никулин]. – Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2011. – 318 с.
4. Бокштейн, Борис Самуилович. Диффузия в металлах: Учеб. пособие для вузов / Б. С. Бокштейн. — М.: Металлургия, 1978.— 248 с.
5. Малкович, Роальд Шлемович. Математика диффузии в полупроводниках. — СПб.: Наука, 1999. — 389 с.
6. Рамбиди, Николай Георгиевич. Физические и химические основы нанотехнологий / Н. Г. Рамбиди, А. В. Березкин. — Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2009. — 456 с.

###### **б) дополнительная литература:**

1. Наноматериалы. Нанотехнологии. Наносистемная техника. Мировые достижения за 2005 год. (Сборник) / [Под ред. П.П. Мальцева]. – Москва: Техносфера, 2006. – 149 с.
2. Pikalova, E.Yu.; Kalinina, E.G. Place of Electrophoretic Deposition Among Thin-Film Methods Adapted to the Solid Oxide Fuel Cell Technology: A Short Review. Int. J. Energy Prod. Manag. **2019**, 4, 1–27. <https://doi.org/10.2495/EQ-V4-N1-1-27>.
3. Kalinina E.G., Pikalova E.Y. // Russ. Chem. Rev. 2019. V. 88. № 12. P. 1179. <https://doi.org/10.1070/RCR4889> [Калинина Е.Г., Пикалова Е.Ю. // Усп. хим. 2019. Т. 88. № 12. С. 1179.]

4. Pikalova E.Yu., Kalinina E.G. // Russ. Chem. Rev. 2021. V. 90. № 6. P. 703. <https://doi.org/10.1070/RCR4966> [Пикалова Е.Ю., Калинина Е.Г. // Усп. хим. 2021. Т. 90. № 6. С. 703.]

**в) методическое обеспечение:**  
<http://iep7.iep.uran.ru/iep/aspir.htm>

## 5.2. Информационное обеспечение

№ п/п	Ссылка на информационный ресурс	Наименование разработки в электронной форме	Доступность
	<a href="http://elibrary.ru/">http://elibrary.ru/</a>	Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU	доступ свободный

## 6. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Для проведения занятий по дисциплине используются: компьютерный класс, лаборатории Института, оборудование: прибор ДРОН для рентгенофазового анализа материалов, микротвердомер, система исследования материалов после облучения ионами ИЛМ.