

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе  
Российской академии наук  
(ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

УТВЕРЖДАЮ

Директор

С.В. Иванов

» 04 2022 г.



Рабочая программа факультативной дисциплины

**СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ**

программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре

по научной специальности 1.3.11 Физика полупроводников

Принята решением Ученого совета  
от 04.03.2022 № 03/22

Санкт-Петербург

2022 г.

Рабочая программа факультативной дисциплины «Современные методы исследования твердых тел» составлена на основании программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре в рамках подготовки аспирантов по научной специальности 1.3.11 Физика полупроводников (далее- программа аспирантуры)

### **1. ЦЕЛЬ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

Целью курса является обеспечение понимания основ физических основ и принципов функционирования современных методов исследования твердых тел, таких как рентгеновская дифракция, просвечивающая электронная микроскопия, растровая электронная микроскопия, сканирующая туннельная микроскопия и атомно-силовая микроскопия. Будут получены знания в различных областях физики твердого тела. Кроме того, будут рассмотрены взаимодействия поверхности твердых тел с рентгеновским излучением, высокоэнергетичными электронами и ионами, также со сверхострыми твердотельными зондами. Будут приведены примеры о том, как использовать описанные выше методы для определения размера, формы, кристаллической и элементной структуры наноматериалов и наноструктур.

### **2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ПРОГРАММЫ АСПИРАНТУРЫ**

Учебная дисциплина «Современные методы исследования твердых тел» входит в факультативную часть программы аспирантуры.

Обучение ведется в форме аудиторных занятий и самостоятельной подготовки.

Изучение дисциплины является основой для самостоятельной научно-исследовательской работы в области исследования свойств конденсированных систем.

В результате прохождения курса обучения по данной дисциплины аспирант должен освоить базовые принципы физики твердого тела в русле проблематики лаборатории (группы), где работает его научный руководитель, и где будет проходить самостоятельная научная работа аспиранта. Изучение данной дисциплины и специфика подачи отдельных вопросов может варьироваться в зависимости от индивидуального плана работы аспиранта, согласованного с его научным руководителем в целях оптимального соответствия решаемым задачам.

### **3. ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

Процесс изучения дисциплины «Современные методы исследования твердых тел» направлен на формирование следующих компетенций в соответствии с программой аспирантуры:

### **3.1. Универсальные компетенции:**

- способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях (УК-1).

### **3.2. Общепрофессиональные компетенции:**

- способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий (ОПК-1);

- готовность организовать работу исследовательского коллектива в области химии и смежных наук (ОПК-2).

### **3.3. Профессиональные компетенции:**

- способность планировать и организовывать работы, направленные на создание и совершенствование экспериментальных методов изучения физико-химических свойств, а также основ промышленной химической технологии получения материалов с заданными свойствами (ПК-1);

- способность к теоретическому и экспериментальному выявлению взаимосвязей состав-структура-свойства для различных химических соединений и материалов на их основе с помощью различных видов внешних воздействий (ПК-2);

- способность к разработке термодинамических и кинетических моделей протекания химических процессов и прогнозированию изменения физико-химических свойств различных химических соединений и материалов на их основе в зависимости от внешних условий (ПК-3);

- способность получать, обрабатывать, анализировать и систематизировать научно-техническую информацию по теме исследования, выбирать и обосновывать методики и средства решения поставленных задач (ПК-4).

В результате освоения дисциплины аспирант должен демонстрировать и применять углубленные знания в профессиональной деятельности.

## **4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **4.1. Объем дисциплины и количество учебных часов**

| <b>Вид учебной работы</b>          | <b>Трудоемкость<br/>(в часах)</b> |
|------------------------------------|-----------------------------------|
| - Лекции                           | 54                                |
| - Самостоятельная работа аспиранта | 90                                |

|                        |            |
|------------------------|------------|
| <b>ИТОГО</b>           | <b>144</b> |
| Вид итогового контроля | зачет      |

#### 4.2. Структура дисциплины

| п/п | Тема   | Виды учебной работы, включая самостоятельную работу, и трудоемкость (в часах) |     |     |           |
|-----|--|---|-----|-----|-----------|
|     |  | Лек   | СЕМ | Лаб | СР        |
| 1.  | Введение   | 6   |     |     | 8         |
| 2.  | Методы диагностики твердых тел параметры, определяемые с помощью | 6   |     |     | 8         |
| 3.  | Фракционные методы исследования кристаллической структуры        | 6   |     |     | 12        |
| 4.  | Высокоразрешающая рентгеновская дифракция                        | 6   |     |     | 12        |
| 5.  | Растровая электронная микроскопия                                | 6   |     |     | 8         |
| 6.  | Просвечивающая электронная микроскопия                           | 6   |     |     | 10        |
| 7.  | Вторичная ионная масспектрометрия                                | 6   |     |     | 10        |
| 8.  | Атомно-силовая микроскопия                                       | 6   |     |     | 10        |
| 9.  | Сканирующая туннельная микроскопия                               | 6   |     |     | 12        |
| 10. | Зачет  |   |     |     |           |
|     | <b>Итого</b>   | <b>54</b>   |     |     | <b>90</b> |

#### 4. СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ (ТЕМ) ДИСЦИПЛИНЫ

##### 5.1. Содержание аудиторных занятий

###### Тема 1. Введение.

Физика твердого тела. Основные параметры и характеристики твердых тел.

**Тема 2. Методы диагностики твердых тел и параметры, определяемые с их помощью**

Физические основы и принципы функционирования современных методов исследования твердых тел, таких как рентгеновская дифракция, просвечивающая

электронная микроскопия, растровая электронная микроскопия, сканирующая туннельная микроскопия и атомно-силовая микроскопия.

### **Тема 3. Дифракционные методы исследования кристаллической структуры.**

Источники рентгеновского излучения. Опыты Лауэ и Брэгга. Дифракция рентгеновских лучей на атомных плоскостях. Схемы установок рентгеновской дифракции. Рентгеновская топография.

### **Тема 4. Высокоразрешающая рентгеновская дифракция.**

Высокоразрешающая рентгеновская дифракция. Влияние наличия и видов дефектов в структуре на положение и форму максимума отражения, их идентификация.

### **Тема 5. Растровая электронная микроскопия.**

Устройство растрового электронного микроскопа, принцип действия, основные характеристики. Взаимодействие высокоэнергетичных электронов с поверхностью твердого тела. Получение изображений с помощью сигналов: обратно-рассеянных электронов, вторичных электронов, Оже-электронов, катодолюмениценция и тока, индуцированный электронным зондом. Рентгеновский микроанализ.

### **Тема 6. Просвечивающая электронная микроскопия.**

Устройство просвечивающего электронного микроскопа, принцип действия, основные характеристики, параметры, определяемые при его помощи. Методы получения изображений в дифракционном и фазовом контрасте. Подготовка образцов для исследования в просвечивающем электронном микроскопе.

### **Тема 7. Вторичная ионная масс-спектрометрия.**

Взаимодействие высокоэнергетичных ионов с поверхностью твердого тела. Конструкция масс-спектрометра и принцип его действия. Виды исследований, производимых с помощью вторичного ионного масс-спектрометра, измеряемые величины.

### **Тема 8. Атомно-силовая микроскопия.**

Устройство атомно-силового микроскопа и принцип его действия. Механизмы взаимодействия зонда и поверхности твердого тела. Виды исследований, производимых с его помощью, измеряемые величины, достижимая точность.

### **Тема 9. Сканирующая туннельная микроскопия.**

Устройство туннельного зондового микроскопа и принцип его действия. Туннельный ток через тонкий барьер. Виды исследований, производимых с помощью сканирующей туннельной микроскопии, измеряемые величины, достижимая точность. Манипуляция атомами.

### **5.2. Самостоятельная работа аспиранта**

Самостоятельная работа аспиранта включает повторение лекционного материала по темам, чтение рекомендованной литературы и научной периодики, а также изучение методических рекомендаций для самостоятельной работы.

## **6. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ**

Цель контроля получение информации о результатах обучения и степени их соответствия результатам обучения.

### **6.1. Текущий контроль**

Текущий контроль проводится еженедельно. Критерии формирования оценки - посещаемость занятий, активность студентов на лекциях, уровень подготовки.

Текущая самостоятельная работа аспиранта направлена на углубление и закрепление знаний, и развитие практических умений.

### **6.2. Аттестация**

Аттестация проводится в форме зачета. Критерии формирования оценки - уровень знаний пройденной части курса.

### **Контрольные вопросы для аттестации:**

Таблица 1

|     | <b>Контрольные вопросы</b>  |
|-----|---|
| 1.  | Дифракция рентгеновских лучей на атомных плоскостях   |
| 2.  | Взаимодействие высокоэнергетичных электронов с поверхностью твердого тела   |
| 3.  | Рентгеновский микроанализ   |
| 4.  | Методы получения изображений в дифракционном и фазовом контрасте в просвечивающем электронном микроскопе  |
| 5.  | Взаимодействие высокоэнергетичных ионов с поверхностью твердого тела.   |
| 6.  | Туннельный ток через тонкий барьер  |
| 7.  | Механизмы взаимодействия зонда атомно-силового микроскопа и поверхности твердого тела.  |
| 8.  | Физические основы и принципы функционирования метода рентгеновской дифракции  |
| 9.  | Физические основы и принципы функционирования метода просвечивающей электронной микроскопии   |
| 10. | Физические основы и принципы функционирования метода растровой электронной микроскопии, сканирующая туннельная микроскопия и атомно-силовая микроскопия |

|     |   |
|-----|---|
| 11. | Физические основы и принципы функционирования метода сканирующей туннельной микроскопии |
| 12. | Физические основы и принципы функционирования метода атомно-силовой микроскопии         |

## **7. Образовательные технологии**

В процессе обучения применяются следующие образовательные технологии:

1. Сопровождение лекций показом визуального материала;
2. Использование компьютерных моделей физических процессов в полупроводниках и диэлектриках;
3. Выполнение лабораторных работ с использованием современного научного оборудования.

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

Учебные, учебно-методические и иные библиотечно-информационные ресурсы обеспечивают учебный процесс и гарантируют возможность качественного освоения аспирантом образовательной программы. ФТИ им. А.Ф.Иоффе располагает обширной библиотекой, включающей общенаучную и специальную литературу.

## **9. Литература**

### ***Основная литература:***

1. Шуберт ФЕ. Светодиоды. М.: Физматлит, 2008. — 495 с.
2. Фульц Б., Хау Д. М. Просвечивающая электронная микроскопия и дифрактометрия материалов. М: Техносфера, 2011. - 904 с.
3. Синдо Д., Оикава Т. Аналитическая просвечивающая электронная микроскопия для материаловедения. М.: Техносфера, 2007. - 255 с.
4. Наногетероструктуры в сверхвысокочастотной полупроводниковой электронике. Сборник, под ред. О. Кулешова. М.: Техносфера, 2010. - 432 с.
5. Васильев А.Г., Колковский Ю.В., Концевой Ю.А. СВЧ транзисторы на широкозонных полупроводниках. М.: Техносфера, 2011. - 256 с.
6. Брандон Д., Каплан В. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля. М.: Техносфера, 2006. — 377 с.
7. Оура К., Лифшиц В. Г., Саранин А. А., Зотов А. В. Введение в физику поверхности. М.: Наука, 2006. - 490 с.
8. Кларк Э.Р., Эберхард К.Н. Микроскопические методы исследования материалов.

М.: Техносфера, 2007. - 376 с.

9. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. М.: Техносфера, 2005.

***Дополнительная литература:***

1. Уманский Я.С., Скаков Ю.А., Иванов А.Н., Расторгуев Л.Н. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия. М.: Металлургия, 1982. — 632 с.

2. Основы аналитической электронной микроскопии / под ред. Дж. Гренг, Дж. И. Гольштейна, ДК. Джоя, АД. Ромига. М.: Металлургия, 1990. — 584 с.

3. Спенс Дж. Экспериментальная электронная микроскопия высокого разрешения. М.: Наука, 1986. - 320 с.

4. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ. Кн. 1. пер. с англ. под ред. В.И. Петрова. М.: Мир, 1984. — 303 с.

5. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ. Кн. 2. пер. с англ. под ред. В.И. Петрова. М.: Мир, 1984. — 348 с.

6. Дифракционные и микроскопические методы в материаловедении. под ред. С. Амелинка, Р. Геверса, Дж. Ван Ланде / пер. с англ. под ред. М.П. Усикова. М.: Металлургия, 1984. — 504 с.

**10. Программное оборудование**

Новые полупроводниковые материалы. Наноструктуры. Характеристики и свойства. База данных разработана и поддерживается сектором теоретических основ микроэлектроники: <http://www.matprop.ru>.

**11. Интернет-ресурсы**

*Отечественные журналы:*

- Физика твердого тела (электронная версия);
- Физика и техника полупроводников (электронная версия);
- ЖЭТФ (электронная версия);
- Успехи физических наук (электронная версия)

*Иностранные журналы:*

1. Physical Review B (American Physical Society);
2. Physical Review Letters (American Physical Society);
3. Applied Physics A: Materials Science & Processing (Springer);
4. Central European Journal of Physics;
5. The European Physical Journal B Condensed Matter and Complex Systems (Springer);



6. International Journal of Modern Physics B (World Scientific Publishing Company);
7. Journal of Physics and Chemistry of Solids (Elsevier (Science Direct));
8. Journal of Physics : Condensed Matter (UK Institute of Physics );
9. Nanotechnology (UK Institute of Physics);
10. Nature (Nature Publishing Group);
11. Nature Materials (Nature Publishing Group);
12. Philosophical Magazine (Taylor & Francis Group);
13. Philosophical Magazine Letters (Taylor & Francis Group);
14. Physica B (Condensed Matter) (Elsevier (Science Direct));
15. Physica E (Nanostructures) ) (Elsevier (Science Direct));
16. Physica Status Solidi A (Wiley);
17. Physica Status Solidi B (Wiley);
18. Physica Status Solidi C (Wiley);
19. Physica Status Solidi RRL (Wiley);
20. Solid State Communications (Elsevier (Science Direct)).

## **12. Материально-техническое обеспечение учебной дисциплины**

Лекционная аудитория, оборудована:

- Столы;
- Стулья;
- Персональный компьютер;
- Доска магнитно-маркерная;
- Экран для презентаций;
- Мультимедийный проектор

Лабораторные помещения, оборудованы:

- Высокоразрешающая рентгеновская станция Discover D8, Bruker;
- Сканирующий зондовый микроскоп Dimension 3 100, Veeco;
- Сканирующий электронный микроскоп JEM-7001F, Jeol;
- Просвечивающий электронный микроскоп JEM-2100F, Jeol;
- Универсальный вторично-ионный микроанализатор Ion Microanalyzer IMS-7F;
- Сканирующий электронный микроскоп FEI Quanta 200.

Программа разработана:

вед.н.с. лаб. диагностики материалов и структур  
твердотельной электроники, д-р физ.-мат. наук, Брунков П.Н.