

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



« 13 » 04 2022 г.



Рабочая программа дисциплины

### **ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ**

программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре  
по научной специальности 1.3.3 Теоретическая физика

Принята решением Ученого совета  
от 04.03.2022 № 03/22

Санкт-Петербург

2022 г.



Рабочая программа дисциплины Физика конденсированного состояния составлена на основании программы подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре по научной специальности 1.3.3 Теоретическая физика (далее – программа аспирантуры)

### **1. Цель освоения дисциплины**

Цель освоения дисциплины – получить знания о фундаментальных закономерностях, лежащих в основе науки о конденсированном состоянии вещества, и современных методах исследования, о новейших результатах исследований и их практическом применении.

### **2. Место дисциплины в структуре программы аспирантуры**

Дисциплина «Физика конденсированного состояния» входит в обязательную часть образовательного компонента программы аспирантуры.

Содержание дисциплины служит основой для:

- подготовки к сдаче экзамена по специальности;
- написания кандидатской диссертации;
- осуществления дальнейшей профессиональной деятельности.

Дисциплина изучается на 3 году обучения в аспирантуре. Обучение ведется в форме аудиторных занятий (лекций) и самостоятельной подготовки.

В результате прохождения курса обучения по данной программе, 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. Компетенции аспиранта, формируемые в результате освоения дисциплины «Физика конденсированного состояния»**

Процесс изучения дисциплины «Физика конденсированного состояния» 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).

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

- способность планировать и организовывать работу, направленную на разработку экспериментальных методов изучения физических свойств и создание физических основ промышленной технологии получения материалов с определенными свойствами (ПК-1);

- способностью к теоретическому и экспериментальному изучению физических свойств различных конденсированных сред, исследованию воздействия различных видов излучений, других внешних воздействий на природу изменений физических свойств конденсированных веществ (ПК-2);

- способностью к разработке математических моделей построения физических моделей и прогнозированию изменения физических свойств конденсированных веществ в зависимости от внешних условий их нахождения (ПК-3);

- способностью 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.

#### **знать:**

основные разделы научной дисциплины «Физика конденсированного состояния»:

- кристаллические и аморфные твердые тела, методы исследования структуры;
- дефекты кристаллической решетки;
- основы зонной теории кристаллов;
- электронные состояния в твердых телах;
- процессы переноса и теплоемкость твердых тел;
- диамагнетизм, парамагнетизм и ферромагнетизм твердых тел;
- сверхпроводимость;
- оптические свойства твердых тел.

#### **уметь:**

– самостоятельно изучать и понимать научную литературу, связанную с проблемами физики твердого тела;

– владеть математическим аппаратом и свободно пользоваться основными формулами, используемыми для оценок величин, характеризующих структуру и свойства кристаллических и аморфных полупроводников и диэлектриков, электронно-дырочные, кинетические, электрические, фотоэлектрические, поверхностные и оптические явления в полупроводниках и диэлектриках;

– профессионально излагать результаты своих исследований и представлять их в виде научных публикаций, информационно-аналитических материалов и презентаций;

**владеть:**

Свободно владеть знаниями по фундаментальным разделам физики конденсированных сред, необходимыми для решения научно-исследовательских задач, научной терминологией, основными понятиями физики твердого тела в пределах, необходимых для понимания специальной научной литературы, связанной с проблемами физики конденсированных сред.

**4. Структура и содержание дисциплины «Физика конденсированного состояния»:**

общая трудоемкость дисциплины составляет 2 зачетные единицы (72 ак.часа).

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

Вид учебной работы	Трудоемкость (час.)
Лекции	38
Самостоятельная работа аспиранта	34
<b>ИТОГО</b>	<b>72</b>
Вид итогового контроля	Канд. экз. по специальности

**4.2. Структура дисциплины**

№ п/п	Тема	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу, и трудоемкость (в часах)	
		Лекции	Самостоятельная работа
1.	Кристаллические и аморфные твердые тела. Методы исследования структуры	4	4
2.	Дефекты кристаллической решетки	4	6
3.	Основы зонной теории кристаллов	8	4
4.	Электронные состояния в твердых телах	4	4
5.	Процессы переноса и теплоемкость твердых тел	4	4
6.	Диамagnetизм, парамагнетизм и ферромагнетизм твердых тел	4	4
7.	Сверхпроводимость	4	4

8.	Оптические явления в твердых телах	6	4
	<b>ИТОГО</b>	<b>38</b>	<b>34</b>

## 5. Содержание разделов (тем) дисциплины

### 5.1. Содержание аудиторных занятий

#### **Тема 1. Кристаллические и аморфные твердые тела. Методы исследования структур - туры**

*(лекции - 4 часа)*

Химическая связь и валентность. Типы сил связи в конденсированном состоянии: ванн-дер ваальсова связь, ионная, ковалентная, металлическая. Основные свойства ковалентной связи. Структура веществ с ковалентными связями. Гибридизация атомных орбиталей в молекулах и кристаллах. Структуры типа алмаза и графита. Кристаллические и аморфные твердые тела. Дифракция рентгеновских лучей, электронов и нейтронов в кристаллах. Дифракция рентгеновских лучей. Брэгговское отражение.

*(СР - 4 часа)*

Поверхности и границы раздела твердых тел. Структура поверхности и химическая связь, релаксировавшие и реконструированные поверхности. Экспериментальные методы приготовления поверхностей и исследования их атомарной структуры.

#### **Тема 2. Дефекты кристаллической решетки**

*(лекции - 4 часа)*

Вакансии и межузельные атомы. Дефекты Френкеля и Шоттки. Точечные дефекты, их образование и диффузия. Линейные дефекты. Краевые и винтовые дислокации. Роль дислокаций в пластической деформации. Движение дислокаций. Подвижность и размножение дислокаций. Взаимодействие дислокаций. Теоретическая прочность твердых тел. Кинетическая природа разрушения. Долговечность и ее зависимость от напряжения и температуры. Формула Журкова. Элементарные акты разрушения. Флуктуации энергии. Квантовые эффекты в разрушении.

*(СР - 6 часов):*

Внутреннее трение, его микромеханизмы. Активная деформация. Ползучесть, ее стадии, температурно-силовая зависимость. Ротационные эффекты при деформации. Деформационное упрочнение, его механизмы. Электро-, фото- и магнито-пластические эффекты. Электронные процессы при деформировании твердых тел. (3 часа)

Микротрещины. Зарождение, рост, накопление, возможности их залечивания. Виды разрушения. Хрупкое и вязкое разрушение. Усталостное разрушение.

Коррозионное разрушение. Разрушение композиционных материалов. Роль поверхностей раздела. Прогнозирование разрушения. (3 часа).

### **Тема 3. Основы зонной теории кристаллов**

*(лекции - 8 часов)*

Основные приближения зонной теории. Граничные условия Борна-Кармана. Волновая функция электрона в периодическом поле кристалла. Теорема Блоха. Квазиимпульс. Обратная решетка и ее свойства. Зоны Бриллюэна. Энергетические зоны. Связь ширины разрешенной зоны с перекрытием волновых функций атомов. Закон дисперсии. Элементы симметрии кристаллов: повороты, отражения, инверсия, инверсионные повороты, трансляции. Операции (преобразования) симметрии. Пространственные и точечные группы (кристаллические классы). Классификация решеток Браве. Кристаллические структуры, отвечающие плотным упаковкам шаров: простая кубическая, ОЦК, ГЦК, типа CsCl и NaCl.

*(СР - 4 часа)*

Метод эффективной массы. Искривление энергетических зон в электрическом поле. Движение электронов и дырок в магнитном поле; циклотронный резонанс и определение эффективных масс носителей.

### **Тема 4. Электронные состояния в твердых телах**

*(лекции - 4 часа)*

Приближение почти свободных электронов. Брэгговское отражение электронов при движении по кристаллу. Полосатый спектр энергии. Заполнение энергетических зон электронами. Поверхность Ферми. Плотность состояний. Проводимость, эффект Холла, термо-ЭДС, фотопроводимость. Парамагнетизм и диамагнетизм электронов проводимости. Спин-волны. Магноны.

*(СР -4 часа)*

Уровни энергии, создаваемые примесными центрами. Водородоподобные примесные центры. Расчет энергии связи мелких и глубоких уровней в кристаллах.

### **Тема 5. Тепловые колебания и процессы переноса в твердых телах**

*(лекции - 4 часа)*

Колебания кристаллической решетки. Уравнения движения атомов. Простая и сложная решетки, одномерные цепочки атомов. Акустические и оптические колебания. Квантование колебаний. Фононы. Электрон-фононное взаимодействие. Тепловое расширение твердых тел, его физическое происхождение. Ангармонические колебания. Классическая теория теплоемкости. Закон равномерного распределения энергии по степеням свободы. Границы справедливости классической теории. Квантовая теория теплоемкости твердых тел по Эйнштейну и Дебаю. Температура Дебая. Решеточная теплоемкость и ее температурная зависимость. Электронная теплоемкость и ее

температурная зависимость. Теплопроводность решеточная и электронная. Закон Видемана – Франца для электронной теплопроводности.

*(СР - 4 часа):*

Формула Друде для проводимости. Рассеяние на заряженных и нейтральных примесях. Рассеяние на акустических и оптических фононах. Общие характеристики различных механизмов рассеяния. Упругое и неупругое рассеяние. Время релаксации импульса и время релаксации энергии.

### **Тема 6. Диамагнетизм, парамагнетизм и ферромагнетизм твердых тел**

*(лекции - 4 часа)*

Намагниченность и восприимчивость. Диамагнетики и парамагнетики. Нормальный и аномальный скин-эффекты. Толщина скин-слоя. Электронный парамагнитный резонанс. Природа ферромагнетизма. Фазовые переходы в ферромагнитное состояние. Ферромагнитные домены. Причины их появления. Доменные границы (Блоха, Нееля). Антиферромагнетики. Магнитная структура. Точка Нееля.

*(СР - 4 часа):*

Магнитное упорядочение и его природа; термодинамика ферромагнетиков; спин-орбитальное взаимодействие и магнитная анизотропия; кривые намагничивания; ферромагнитные доменные стенки и их строение, доменные структуры; магнитоstriction; магнитный резонанс и спиновые волны. (2 часа).

Параметр порядка антиферромагнетиков; магнитная анизотропия; фазовые переходы; антиферромагнитные домены и доменные стенки; антиферромагнитный резонанс и спиновые волны; магнитоэлектрический и пьезомагнитный эффекты в антиферромагнетиках. (2 часа)

### **Тема 7. Сверхпроводимость**

*(лекции - 4 часа)*

Сверхпроводимость. Эффекты Мейснера и Джозефсона. Куперовское спаривание. Длина когерентности. Энергетическая щель. Сверхпроводники I-го и II-го рода. Сверхпроводники и их магнитные свойства. Вихри Абрикосова. Высокотемпературные сверхпроводники.

*(СР - 4 часа):*

Основные экспериментальные факты - характеристики сверхпроводимости. Критическая температура. Разрушение сверхпроводимости магнитным полем. Теория сверхпроводимости Гинзбурга-Ландау. Микроскопическая теория сверхпроводимости (БКШ). Связь БКШ с теорией Гинзбурга-Ландау. Слабая сверхпроводимость. Применения сверхпроводников.

## **Тема 8. Оптические явления в твердых телах**

*(лекции - 6 часов)*

Комплексная диэлектрическая проницаемость и оптические постоянные. Коэффициенты поглощения и отражения. Поглощение света в полупроводниках (поглощение свободными носителями, решеткой, межзонное и примесное поглощение). Свободные и связанные экситоны. Экситонное поглощение и излучение. Магнитооптические эффекты Фохта и Керра. Магнитооптический эффект Фарадея.

*(СР - 4 часа)*

Край собственного поглощения в случае прямых и непрямых, разрешенных и запрещенных переходов. Экситон-фононное взаимодействие в оптических спектрах полупроводников и щелочно-галогидных кристаллов. Автолокализация экситонов. Собственная излучательная рекомбинация и рекомбинация с участием примесей и дефектов. Спектры возбуждения люминесценции.

### **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 к работе в лаборатории.

## **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. Промежуточная аттестация**

Промежуточная аттестация проводится в форме экзамена.

### **Вопросы для подготовки к сдаче кандидатского экзамена:**

1. Вакансии и межузельные атомы. Дефекты Френкеля и Шоттки.
2. Теорема Блоха. Квазиимпульс. Зоны Бриллюэна.
3. Квантовая теория теплоемкости твердых тел по Эйнштейну и Дебаю. Температура Дебая.
4. Спиновые волны. Магноны.
5. Точечные дефекты, их образование и диффузия



6. Связь ширины разрешенной зоны с перекрытием волновых функций атомов. Закон дисперсии.
7. Дифракция рентгеновских лучей, электронов и нейтронов в кристаллах.
8. Поглощение света в полупроводниках (поглощение свободными носителями, решеткой).
9. Линейные дефекты. Краевые и винтовые дислокации. Роль дислокаций в пластической деформации.
10. Тепловое расширение твердых тел, его физическое происхождение. Ангармонические колебания.
12. Решеточная теплоемкость и ее температурная зависимость.
13. Нормальный и аномальный скин-эффекты. Толщина скин-слоя.
14. Типы сил связи в конденсированном состоянии: ван-дер-ваальсова связь, ионная, ковалентная, металлическая.
15. Намагниченность и восприимчивость. Диамагнетики и парамагнетики.
16. Электронная теплоемкость и ее температурная зависимость.
17. Металлы, диэлектрики, полупроводники.
18. Элементарная ячейка. Ячейка Вигнера-Зейтца. Решетка Браве.
19. Проводимость, эффект Холла, термо ЭДС, фотопроводимость.
20. Гибридизация атомных орбиталей в молекулах и кристаллах. Структуры типа алмаза и графита.
21. Электронный парамагнитный резонанс.
22. Колебания кристаллической решетки. Уравнения движения атомов. Простая и сложная одномерные цепочки атомов.
23. Магнитооптический эффект Фарадея.
24. Элементы симметрии кристаллов: повороты, отражения, инверсия, инверсионные повороты, трансляции. Операции (преобразования) симметрии.
25. Заполнение энергетических зон электронами. Поверхность Ферми. Плотность состояний.
26. Теплопроводность решеточная и электронная. Закон Видемана – Франца для электронной теплопроводности.
27. Природа ферромагнетизма. Фазовые переходы в ферромагнитное состояние.
28. Акустические и оптические колебания. Квантование колебаний.
29. Ферромагнитные домены. Причины их появления. Доменные границы (Блоха, Нееля).
30. Фононы. Электрон-фононное взаимодействие.
31. Ядерный магнитный резонанс.

32. Химическая связь и валентность. Основные свойства ковалентной связи. Структура веществ с ковалентными связями.

33. Приближение почти свободных электронов. Брэгговские отражения электронов.

34. Классическая теория теплоемкости. Закон равномерного распределения энергии по степеням свободы. Границы справедливости классической теории.

35. Поглощение света в полупроводниках (межзонное и примесное поглощение).

36. Обратная решетка и ее свойства. Зона Бриллюэна.

37. Высокотемпературные сверхпроводники.

38. Комплексная диэлектрическая проницаемость и оптические постоянные. Коэффициенты поглощения и отражения.

39. Сверхпроводники I-го и II-го рода.

40. Брэгговское отражение электронов при движении по кристаллу. Полосатый спектр энергии.

41. Магнитооптические эффекты Фохта и Керра.

42. Дифракция рентгеновских лучей. Брэгговское отражение.

43. Основные приближения зонной теории. Граничные условия Борна-Кармана

44. Кристаллические и аморфные твердые тела.

45. Сверхпроводники и их магнитные свойства. Вихри Абрикосова.

46. Кристаллические структуры, отвечающие плотным упаковкам шаров: простая кубическая, ОЦК, ГЦК, ГПЦ, типа CsCl и NaCl.

47. Сверхпроводимость. Эффекты Мейснера и Джозефсона.

48. Пространственные и точечные группы (кристаллические классы). Классификация решеток Браве.

49. Антиферромагнетики. Магнитная структура. Точка Нееля. Восприимчивость.

50. Парамагнетизм и диамагнетизм электронов проводимости.

51. Куперовское спаривание. Длина когерентности. Энергетическая щель.

## **7. Образовательные технологии**

В процессе обучения применяются следующие образовательные технологии:

1. Сопровождение лекций показом визуального материала;

2. Использование компьютерных моделей физических процессов в полупроводниках;

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.

### **8.1 Литература**

#### ***Основная литература:***

1. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. Учебное руководство, 2-е изд./ Ч. Киттель. – 2006. М. ООО «МедиаСтар» и предшествующие издания.
2. Фейнман Р.Ф. Фейнмановские лекции по физике. Вып.7. Физика сплошных тел. 3-е изд./ Р. Ф. Фейнман 2008. М. изд. «УРСС» и предшествующие издания.
3. Савельев И.В. Курс общей физики. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Кн.5/ И. В. Савельев. – 2007. М. изд. «АСТ» и предшествующие издания.
4. Воронов В.К. Современная физика: Конденсированное состояние: Учебное пособие./ В. К. Воронов. - 2008. М. изд. ЛКИ.
5. Шмидт В.В. Введение в физику сверхпроводников. М., Наука, 2000
6. Питер Ю, Мануэль Кардона. Основы физики полупроводников. М. Физмат- лит, 2002

Отечественные журналы:

1. Физика Твердого Тела (бумажная версия)
2. Физика и Техника Полупроводников (бумажная версия)

Иностранные

журналы:

1. Nature (бумажная версия)
2. Phys. Rev. B (бумажная версия)
3. Physics E: Solid State (бумажная версия)

#### ***Дополнительная литература***

1. Кейси Х., Паниш М. «Лазеры на гетероструктурах», 2 тома. М.: Мир, 1981
2. Р.Смит «Полупроводники». М.:Мир, 1982
3. Херман М. «Полупроводниковые сверхрешетки». М.: Мир, 1989
4. Воробьев Л.Е. «Фотоэлектрические явления в полупроводниках и размерно-квантовых структурах». СПб: Наука, 2001
5. Винтайкин Б.Е. «Физика твердого тела». М.: МГТУ, 2008

### **8.2. Программное обеспечение**

1. Новые полупроводниковые материалы. Наноструктуры. Характеристики и свойства. База данных разработана и поддерживается сектором теоретических основ

микроэлектроники: <http://www.matprop.ru/>

2. Углеродные наноструктуры. Информационно-библиографическая база данных, поддерживаемая лабораторией физики кластерных структур: <http://www.Ioffe.ru/db-vul/>

### **8.3. Интернет-ресурсы**

#### Отечественные журналы:

1. Физика твердого тела. электронная версия;
2. Физика и техника полупроводников. электронная версия;
3. ЖЭТФ; электронная версия;
4. Письма в ЖЭТФ электронная версия;
5. Успехи физических наук электронная версия ;

#### Иностранные журналы:

1. Physical Review B (American Physical Society) электронная версия;
2. Physical Review Letters (American Physical Society) электронная версия;
4. Applied Physics A: Materials Science & Processing (Springer);
5. Central European Journal of Physics ;
6. The European Physical Journal B Condensed Matter and Complex Systems (Springer);
7. International Journal of Modern Physics B (World Scientific Publishing Company) электронная версия;
8. Journal of Physics and Chemistry of Solids (Elsevier (Science Direct) электронная версия;
9. Journal of Physics : Condensed Matter (UK Institute of Physics ) электронная версия;
10. Journal of Non-crystalline Solids (Elsevier (Science Direct) электронная версия;
11. Journal of Magnetism and Magnetic Materials (Elsevier (Science Direct) электронная версия;
12. Nanotechnology (UK Institute of Physics ) электронная версия;
13. Nature (Nature Publishing Group) электронная версия;
14. Nature Materials (Nature Publishing Group) электронная версия;
15. New Journal of Physics" (UK Institute of Physics) электронная версия;
- Philosophical Magazine (Taylor & Francis Group) электронная версия;
16. Philosophical Magazine Letters (Taylor & Francis Group) электронная версия;
17. Physica B (Condensed Matter) (Elsevier (Science Direct) электронная версия;
18. Physica C (Superconductivity) ) (Elsevier (Science Direct) электронная версия;
19. Physica E (Nanostructures) ) (Elsevier (Science Direct) электронная версия;
20. Physica Status Solidi A (Wiley) ) электронная версия;

19. Physica C (Superconductivity) ) (Elsevier (Science Direct), электронная версия;
20. Physica E (Nanostructures) ) (Elsevier (Science Direct), электронная версия;
21. Physica Status Solidi A (Wiley), электронная версия;
22. Physica Status Solidi B (Wiley), электронная версия;
23. Physica Status Solidi C (Wiley), электронная версия;
24. Physica Status Solidi RRL (Wiley), электронная версия;
25. Solid State Communications (Elsevier (Science Direct), электронная версия

### **9. Материально-техническое обеспечение дисциплины**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН располагает материально-технической базой, соответствующей санитарно-техническим нормам и обеспечивающей проведение всех видов теоретической и практической подготовки, предусмотренной учебным планом.

*Для проведения занятий по дисциплине имеются:*

- Лекционная аудитория;
- Мультимедийный проектор;
- Персональный компьютер

Лаборатория оптики полупроводников и лаборатория спектроскопии твердого тела, располагающие экспериментальными комплексами для исследования оптических спектров излучения, поглощения, рассеяния и отражения твердыми телами в широком спектральном интервале от ближней ИК- области до ближней УФ области спектра.

1. Лаборатория оптики поверхности, имеющая оборудование для исследования поверхности методами сканирующей туннельной и атомно-силовой микроскопии, в том числе и в высоком вакууме.

2. Лаборатория микроволновой спектроскопии кристаллов с оборудованием для исследования спектров ЭПР, двойного электронно-ядерного резонанса, а также оптического детектирования магнитного резонанса.

3. Лаборатории физики профилированных кристаллов, физики прочности и динамики материалов располагают оборудованием для контроля физических процессов при деформировании и разрушении твердых тел в статических и динамических условиях нагрузки.

Программа разработана:

вед.н.с. лаб. спектроскопии твердого тела,  
д-р физ.-мат.наук Резницкий А.Н.