

### Рабочая программа дисциплины

1. Название дисциплины: «Электронный транспорт в низкоразмерных структурах»
2. Уровень высшего образования – подготовка научно-педагогических кадров в аспирантуре.
3. Направление подготовки: 03.06.01 «Физика и Астрономия». Научная специальность 01.04.07, 01.04.10, 01.04.11, 05.13.18.
4. Место дисциплины (модуля) в структуре ООП: курс относится к дисциплинам научной специальности вариативной части Блока 1, по результатам освоения которых обучающиеся сдают кандидатский экзамен по научной специальности.
5. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями выпускников).

<b>Формируемые компетенции (код компетенции)</b>	<b>Планируемые результаты обучения по дисциплине</b>
УК-1	<i>З1 (УК-1) <b>Знать</b> методы критического анализа и оценки современных научных достижений, а также методы генерирования новых идей при решении исследовательских и практических задач в области нанофизики и наноэлектроники, посвященных изучению электронного транспорт в низкоразмерных структурах. У1 (УК-1) <b>Уметь</b> анализировать альтернативные варианты решения исследовательских и практических задач и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов при исследовании электронного транспорт в низкоразмерных структурах.</i>

	<p><i>В1 (УК-1) Владеть навыками анализа методологических проблем, возникающих при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях (конденсированное состояние вещества, магнитные явления, полупроводники, наноструктуры, численные методы).</i></p>
<p><i>УК-3</i></p>	<p><i>З1 (УК-3) Знать особенности представления результатов научной деятельности в устной и письменной форме при работе в российских и международных исследовательских коллективах в области явлений в структурах пониженной размерности, связанных с электронным транспортом.</i></p> <p><i>У1 (УК-3) Уметь следовать нормам, принятым в научном общении при работе в российских и международных исследовательских коллективах с целью решения научных и научно-образовательных задач в области нанофизики и наноэлектроники, посвященных изучению электронного транспорт в низкоразмерных структурах.</i></p> <p><i>В1 (УК-3) Владеть навыками анализа основных мировоззренческих и методологических проблем, в.т.ч. междисциплинарного характера, возникающих при работе по решению научных и научно-образовательных задач в российских или международных исследовательских коллективах в области</i></p>

	<p>нанопластики и наноэлектроники, посвященных изучению электронного транспорта в низкоразмерных структурах.</p>
УК-5	<p>З1 (УК-5) <b>Знать</b> содержание процесса целеполагания профессионального и личностного развития, его особенности и способы реализации при решении профессиональных задач, исходя из этапов карьерного роста и требований рынка труда в сфере металлических и полупроводниковых структур пониженной размерности.</p> <p>У1 (УК-5) <b>Уметь</b> формулировать цели личностного и профессионального развития и условия их достижения, исходя из тенденций развития области профессиональной деятельности, этапов профессионального роста, индивидуально-личностных особенностей в сфере металлических и полупроводниковых структур пониженной размерности.</p> <p>В1 (УК-5) <b>Владеть</b> приемами и технологиями целеполагания, целереализации и оценки результатов деятельности по решению профессиональных задач в сфере металлических и полупроводниковых структур пониженной размерности.</p>
ОПК-1	<p><b>Знать</b> физические принципы основных методов исследования электронного транспорта в низкоразмерных структурах.</p> <p><b>Уметь</b> применять физические теории к</p>

	<p>описанию соответствующих методов исследования электронного транспорта в низкоразмерных структурах.</p> <p><b>Владеть</b> методиками построения моделей, описывающих электронный транспорт в низкоразмерных структурах.</p>
--	---

6. Объем дисциплины (модуля) в зачетных единицах с указанием количества академических или астрономических часов, выделенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающихся:

*Объем дисциплины составляет 3 зачетных единицы, всего 108 часов, из которых 36 часов составляет контактная работа аспиранта с преподавателем (36 часов занятия лекционного типа, 2 часа групповые консультации, 6 часов индивидуальные консультации, 4 часа мероприятия текущего контроля успеваемости, 36 часов мероприятия промежуточной аттестации), 60 часов составляет самостоятельная работа аспиранта. Форма отчетности по всем дисциплинам зачет с оценкой.*

7. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия.

8. Формат обучения: очный, дистанционное обучение не предусмотрено

9. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества **академических** часов и виды учебных занятий

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля),	Всего (часы)	В том числе	
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них	Самостоятельная работа обучающегося, часы из них

форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Групповые консультации	Индивидуальные консультации	Учебные занятия, направленные на проведение текущего контроля успеваемости коллоквиумы, практические контрольные занятия и др)*	<b>Всего</b>	Выполнение домашних заданий	Подготовка рефератов и т.п..	<b>Всего</b>
Тема 1. Электрическое сопротивление. Диаграмма энергетических уровней. Квант проводимости.	10	4			2		2	1		1
Тема 2. Уравнение Шрёдингера. Атом водорода. Метод конечных разностей. Частица в потенциальной яме.	8	4					2	1		1
Тема 3. Приближение самосогласованного поля. Связь с многоэлектронной картиной. Типы связи.	8	4					2	1		1
Тема 4. Базисные функции как инструмент численных	9	3					4	1		1

методов. Равновесная матрица плотности. Матрица плотности.										
Тема 5. Зонная структура. Влияние спин-орбитального взаимодействия. Уравнение Дирака.	19	3			2	2	4	1	3	4
Тема 6. Квантовые ямы, проволоки, точки и «нанотрубки». Плотность состояний. Минимальное сопротивление проволоки.	7	3					2	1		1
Тема 7. Емкость. Модельный гамильтониан. Квантовая и электростатическая емкость.	9	3					4	1		1
Тема 8. Уширение уровней. Открытые системы. Локальная плотность состояний. Время жизни.	7	3					2	1		1
Тема 9. Когерентный транспорт. Матрица	9	3					4	1		1

плотности. Входящий и исходящий токи. Функция пропускания.											
Тема 10. Некогерентный транспорт. Атомные переходы. Межзонные переходы в полупроводниках. Внутризонные переходы в полупроводниках.	15	3					4	1	3	4	
Тема 11. Уравнения квантового транспорта. Закон Ома. Классический транспорт. Когерентный транспорт. Эффект «Пельтье».	13	3		2	2	2	2	1		1	
Промежуточная аттестация								<b>36</b>			
<b>Итого</b>	<b>108</b>	36		2	6	4	<b>48</b>	51	9	<b>60</b>	

10. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы аспирантов по дисциплине.

*Практическая самостоятельная работа аспиранта проводится в виде самостоятельной проработки тем дисциплины по предложенным аспирантам учебным материалам (см. в п.12 перечень основной и дополнительной учебной литературы). Текущий контроль*

осуществляется путем индивидуального обсуждения с преподавателем выполненного ПСР или путем групповой дискуссии в группе аспирантов при участии преподавателя. Типовые задания для ПСР определяются списком вопросов и заданий по курсу, приведенным в п.12.

11. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине.

РЕЗУЛЬТАТ ОБУЧЕНИЯ по дисциплине (модулю)	КРИТЕРИИ ОЦЕНИВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТА ОБУЧЕНИЯ по дисциплине (модулю) и ШКАЛА оценивания				ПРОЦЕДУРЫ ОЦЕНИВАНИЯ*
	2	3	4	5	
<i>З1 (УК-1) Знать</i> методы критического анализа и оценки современных научных достижений, а также методы генерирования новых идей при решении исследовательских и практических задач в области нанофизики и наноэлектроники, посвященных изучению электронного транспорт в низкоразмерных структурах.	<i>Фрагментарные знания методов критического анализа и оценки современных научных достижений, а также методов генерирования новых идей при решении исследовательских и практических задач</i>	<i>Общие, но не структурированные знания методов критического анализа и оценки современных научных достижений, а также методов генерирования новых идей при решении исследовательских и практических задач</i>	<i>Сформированные, но содержащие отдельные пробелы знания основных методов критического анализа и оценки современных научных достижений, а также методов генерирования новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе междисциплинарных.</i>	<i>Сформированные систематические знания методов критического анализа и оценки современных научных достижений, а также методов генерирования новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе междисциплинарных.</i>	<i>Индивидуальное собеседование, письменные ответы на вопросы, рейтинг</i>
<i>У1 (УК-1) Уметь</i> анализировать	<i>Частично освоенное умение анализировать</i>	<i>В целом успешно, но не систематически осуществляемые анализ</i>	<i>В целом успешно, но содержащие отдельные пробелы анализ</i>	<i>Сформированное умение анализировать альтернативные</i>	<i>Индивидуальное собеседование,</i>



<p>альтернативные варианты решения исследовательских и практических задач и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов при исследовании электронного транспорт в низкоразмерных структурах.</p>	<p>альтернативные варианты решения исследовательских и практических задач и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов</p>	<p>альтернативных вариантов решения исследовательских и практических задач и оценка потенциальных выигрышей/проигрышей реализации этих вариантов</p>	<p>альтернативных вариантов решения исследовательских задач и оценка потенциальных выигрышей/проигрышей реализации этих вариантов</p>	<p>варианты решения исследовательских и практических задач и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов</p>	<p>письменные ответы на вопросы, рейтинг</p>
<p><b>В1 (УК-1) Владеть</b> навыками анализа методологических проблем, возникающих при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях (конденсированное состояние вещества, магнитные явления, полупроводники, наноструктуры, численные методы).</p>	<p>Фрагментарное применение навыков анализа методологических проблем, возникающих при решении исследовательских и практических задач</p>	<p>В целом успешное, но не систематическое применение навыков анализа методологических проблем, возникающих при решении исследовательских и практических задач</p>	<p>В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы применение навыков анализа методологических проблем, возникающих при решении исследовательских и практических задач</p>	<p>Успешное и систематическое применение навыков анализа методологических проблем, возникающих при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях</p>	<p>Индивидуальное собеседование, письменные ответы на вопросы, рейтинг</p>
<p><b>З1 (УК-3) Знать</b> особенности</p>	<p>Фрагментарные знания особенностей предоставления</p>	<p>Неполные знания особенностей представления</p>	<p>Сформированные, но содержащие отдельные пробелы знания</p>	<p>Сформированные и систематические знания особенностей</p>	<p>Индивидуальное собеседование,</p>

<p>представления результатов научной деятельности в устной и письменной форме при работе в российских и международных исследовательских коллективах в области явлений в структурах пониженной размерности, связанных с электронным транспортом.</p>	<p>результатов научной деятельности в устной и письменной форме</p>	<p>результатов научной деятельности в устной и письменной форме, при работе в российских и международных коллективах</p>	<p>основных особенностей представления результатов научной деятельности в устной и письменной форме при работе в российских и международных исследовательских коллективах</p>	<p>представления результатов научной деятельности в устной и письменной форме при работе в российских и международных исследовательских коллективах</p>	<p>письменные ответы на вопросы, рейтинг</p>
<p>У1 (УК-3) Уметь следовать нормам, принятым в научном общении при работе в российских и международных исследовательских коллективах с целью решения научных и научно-образовательных задач в области нанофизики и наноэлектроники, посвященных изучению электронного</p>	<p>Фрагментарное следование нормам, принятым в научном общении при работе в российских и международных исследовательских коллективах с целью решения научных и научно-образовательных задач</p>	<p>В целом успешное, но не систематическое следование нормам, принятым в научном общении при работе в российских и международных исследовательских коллективах с целью решения научных и научно-образовательных задач</p>	<p>В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение следовать основным нормам, принятым в научном общении при работе в российских и международных исследовательских коллективах с целью решения научных и научно-образовательных задач</p>	<p>Успешное и систематическое следование нормам, принятым в научном общении, для успешной работы в российских и международных исследовательских коллективах с целью решения научных и научно-образовательных задач</p>	<p>Индивидуальное собеседование, письменные ответы на вопросы, рейтинг</p>

<p>транспорт низкоразмерных структурах.</p>					
<p><b>В1 (УК-3) Владеть</b> навыками анализа основных мировоззренческих и методологических проблем, в т.ч. междисциплинарного характера, возникающих при работе по решению научных и научно- образовательных задач в российских или международных исследовательских коллективах в области нанофизики и наноэлектроники, посвященных изучению электронного транспорт в низкоразмерных структурах.</p>	<p>Фрагментарное применение навыков анализа основных мировоззренческих и методологических проблем, в т.ч. междисциплинарного характера, возникающих при работе по решению научных и научно- образовательных задач в российских или международных исследовательских коллективах</p>	<p>В целом успешное, но не систематическое применение навыков анализа основных мировоззренческих и методологических проблем, в т.ч. междисциплинарного характера, возникающих при работе по решению научных и научно- образовательных задач в российских или международных исследовательских коллективах</p>	<p>В целом успешное, но сопровождающееся отдельными ошибками применение навыков анализа основных мировоззренческих и методологических проблем, в т.ч. междисциплинарного характера, возникающих при работе по решению научных и научно- образовательных задач в российских или международных исследовательских коллективах</p>	<p>Успешное и систематическое применение навыков анализа основных мировоззренческих и методологических проблем, в т.ч. междисциплинарного характера, возникающих при работе по решению научных и научно- образовательных задач в российских или международных исследовательских коллективах</p>	<p>Индивидуальное собеседование, письменные ответы на вопросы, рейтинг</p>
<p><b>З1 (УК-5) Знать</b> содержание процесса целеполагания профессионального и личностного развития, его</p>	<p>Допускает существенные ошибки при раскрытии содержания процесса целеполагания, его особенностей и</p>	<p>Демонстрирует частичные знания содержания процесса целеполагания, некоторых особенностей профессионального</p>	<p>Демонстрирует знания сущности процесса целеполагания, отдельных особенностей процесса и способов его реализации,</p>	<p>Раскрывает полное содержание процесса целеполагания, всех его особенностей, аргументированно обосновывает критерии выбора</p>	<p>Индивидуальное собеседование, письменные ответы на вопросы, рейтинг</p>

<p>особенности и способы реализации при решении профессиональных задач, исходя из этапов карьерного роста и требований рынка труда в сфере металлических и полупроводниковых структур пониженной размерности.</p>	<p>способов реализации.</p>	<p>развития и самореализации личности, указывает способы реализации, но не может обосновать возможность их использования в конкретных ситуациях.</p>	<p>характеристик профессионального развития личности, но не выделяет критерии выбора способов целереализации при решении профессиональных задач.</p>	<p>способов профессиональной и личностной целереализации при решении профессиональных задач.</p>	
<p>У1 (УК-5) Уметь формулировать цели личностного и профессионального развития и условия их достижения, исходя из тенденций развития области профессиональной деятельности, этапов профессионального роста, индивидуально-личностных особенностей в сфере металлических и полупроводниковых структур пониженной</p>	<p>Имея базовые представления о тенденциях развития профессиональной деятельности и этапах профессионального роста, не способен сформулировать цели профессионального и личностного развития.</p>	<p>При формулировке целей профессионального и личностного развития не учитывает тенденции развития сферы профессиональной деятельности и индивидуально-личностные особенности.</p>	<p>Формулирует цели личностного и профессионального развития, исходя из тенденций развития сферы профессиональной деятельности и индивидуально-личностных особенностей, но не полностью учитывает возможные этапы профессиональной социализации.</p>	<p>Готов и умеет формулировать цели личностного и профессионального развития и условия их достижения, исходя из тенденций развития области профессиональной деятельности, этапов профессионального роста, индивидуально-личностных особенностей.</p>	<p>Индивидуальное собеседование, письменные ответы на вопросы, рейтинг</p>

<i>размерности.</i>					
<b>В1 (УК-5) Владеть</b> приемами и технологиями целеполагания, целереализации и оценки результатов деятельности по решению профессиональных задач в сфере металлических и полупроводниковых структур пониженной размерности.	Владеет отдельными приемами и технологиями целеполагания, целереализации и оценки результатов деятельности по решению <b>стандартных</b> профессиональных задач, допуская ошибки при выборе приемов и технологий и их реализации.	Владеет отдельными приемами и технологиями целеполагания, целереализации и оценки результатов деятельности по решению <b>стандартных</b> профессиональных задач, давая не полностью аргументированное обоснование предлагаемого варианта решения.	Владеет приемами и технологиями целеполагания, целереализации и оценки результатов деятельности по решению <b>стандартных</b> профессиональных задач, полностью аргументируя предлагаемые варианты решения.	Демонстрирует владение системой приемов и технологий целеполагания, целереализации и оценки результатов деятельности по решению <b>нестандартных</b> профессиональных задач, полностью аргументируя выбор предлагаемого варианта решения.	Индивидуальное собеседование, письменные ответы на вопросы, рейтинг
<b>ОПК-1. Знать</b> физические принципы основных методов исследования электронного транспорта в низкоразмерных структурах.	Допускает существенные ошибки при описании соответствующих методов.	Допускает отдельные ошибки при описании соответствующих методов.	Демонстрирует знание сущности при описании соответствующих методов в стандартных ситуациях.	Демонстрирует знание сущности при описании соответствующих методов нестандартных ситуациях.	Индивидуальное собеседование, письменные ответы на вопросы, рейтинг
<b>ОПК-1. Уметь</b> применять физические теории к описанию соответствующих методов исследования электронного	Допускает существенные ошибки при применении соответствующих методов.	Допускает отдельные ошибки при применении соответствующих методов.	Демонстрирует знание сущности при применении соответствующих методов в стандартных ситуациях.	Демонстрирует знание сущности при применении соответствующих методов нестандартных ситуациях.	Индивидуальное собеседование, письменные ответы на вопросы, рейтинг

<i>транспорт низкоразмерных структурах.</i>	<i>в</i>					
<b>ОПК-1. Владеть</b> <i>методиками построения моделей, описывающих электронный транспорт низкоразмерных структурах.</i>	<i>в</i>	<i>Допускает существенные ошибки при использовании соответствующих методов.</i>	<i>Допускает отдельные ошибки при использовании соответствующих методов.</i>	<i>Демонстрирует знание сущности при использовании соответствующих методов стандартных ситуациях.</i>	<i>Демонстрирует знание сущности при использовании соответствующих методов нестандартных ситуациях.</i>	<i>Индивидуальное собеседование, письменные ответы на вопросы, рейтинг</i>

- Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения, характеризующих этапы формирования компетенций

Вопросы и задания по курсу:

1. В чем физическая суть электрического сопротивления?
2. Запишите выражение для проводимости в случае классической теории.
3. Что такое собственные и примесные полупроводники?
4. Запишите уравнение Шрёдингера и найдите его решение для частицы в потенциальной яме.
5. Опишите приближение самосогласованного поля.
6. Расскажите о базисных функциях как инструменте численных методов.
7. Нарисуйте схематично приведенную зонную структуру для металлов и полупроводников
8. Как учет спин-орбитального взаимодействия влияет на проводимость?
9. Для каких частиц применяется уравнение Дирака, и в чем заключаются характерные особенности уравнения Дирака?
10. Что такое квантовые ямы, проволоки, точки и «нанотрубки»?
11. Постройте графики плотности состояний для 0D, 1D, 2D и 3D систем.
12. Получите выражение для кванта проводимости в баллистическом режиме проводимости.
13. Получите выражения для емкости для макроскопического и микроскопического конденсатора.
14. Что такое открытые системы?
15. Как связана электрическая проводимость с функцией пропускания.

16. В чем заключается различие между когерентным и некогерентным транспортом.
17. Перечислите основные различия между металлами диэлектриками и полупроводниками.
18. Назовите критерии появления излучения Черенкова.
19. Покажите на примере проводимости переход от квантового транспорта к классическому закону Ома.
20. Опишите основные экспериментальные методы создания атомных контактов.
21. Как проводимость атомных контактов зависит от характерных времен.
22. Что такое спинтроника?
23. Что такое спиновый фильтр?
24. От чего зависят магнитные свойства атомных контактов?

- Методические материалы, определяющие процедуры оценивания результатов обучения  
*Презентации методических материалов к основным разделам и темам дисциплины. Доступны для обучающихся на сайте научной группы после изложения соответствующего раздела дисциплины.*

## 12. Ресурсное обеспечение:

- Перечень основной и дополнительной учебной литературы
  1. Landauer R, *Electrical resistance of disordered one-dimensional lattices, Phil. Mag.* 21 863 (1970).
  2. Agrait N, Yeyati A L, van Ruitenbeek, *Quantum properties of atomic-sized conductors, J M Phys. Rep.* 377 81 (2003).
  3. Датта С, *Квантовый транспорт от атома к транзистору, М.-Ижевск: НИЦ Регулярная и хаотическая динамика, Институт компьютерных исследований, 2009.*
  4. А.Л. Клавсюк, А.М. Салецкий, «Формирование и свойства металлических атомных контактов», *УФН* 185, выпуск 10 (2015).
  5. Лесовик Г Б, Садовский И А, *Описание квантового электронного транспорта с помощью матриц рассеяния, УФН* 181 1041 (2011).
  6. Ландау Л Д, Лифшиц Е М, *Теория поля (М.: Физматлит, 2006)*
  7. Ландау Л Д, Лифшиц Е М, *Статистическая физика, Т. 1 М.: Физматлит, 2010.*
  8. Демиховский В Я, Вугальтер Г А, *Физика квантовых низкоразмерных структур, М.: Логос, 2000.*
  9. Киттель Ч., *Введение в физику твердого тела, М.: Наука, 1978.*
- Перечень используемых информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса, включая программное обеспечение, информационные справочные системы (при необходимости):

*Операционная система Windows*  
*Программа Microsoft PowerPoint*

- Описание материально-технической базы.  
*Проекторное оборудование, ноутбук и маркерная доска.*

13. Язык преподавания. Русский

14. Преподаватель (преподаватели). *Клавсюк Андрей Леонидович, кандидат физ.-мат. наук, кафедра общей физики.*