

Рабочая программа дисциплины

1. Название дисциплины: *Нанoeлектронные устройства.*

2. Уровень высшего образования – *магистратура*

3. Направление подготовки: *03.03.02 Физика (магистратура)*

4. Аннотация:

- Курс направлен на ознакомление студентов старших курсов с современными исследованиями в области мезоскопической физики: разработкой методов изготовления наноразмерных структур и создания на их основе оригинальных нанoeлектронных устройств, включая и разработку специфических наноматериалов. Анализируются оригинальные экспериментальные работы в области одноэлектроники, нанoeлектроники, наномеханики, включая выполненные лабораторией «Криoeлектроника» в кооперации с европейскими исследовательскими центрами.

5. Объем дисциплины 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 (указывается согласно рабочему плану):

Объем дисциплины составляет 2 зачетных единицы, всего 68 часов, из которых 34 часа составляет контактная работа обучающегося с преподавателем, 34 часа составляет самостоятельная работа обучающегося.

6. Входные требования для освоения дисциплины, предварительные условия: Компетенции ПК-1; ПК-2; ПК-5; ПК-6; ОНК-5

7. 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, форма промежуточной аттестации по дисциплине	Всего, часы	В том числе							
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них					Самостоятельная работа обучающегося, часы из них		
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Групповые консультации	Индивидуальные консультации	Учебные занятия, направленные на проведение текущего контроля успеваемости коллоквиумы, практические контрольные занятия и др.*	Всего	Выполнение домашних заданий	Подготовка рефератов и т.п.
<ul style="list-style-type: none"> Одноэлектронные наноструктуры. 2 часа. Кулоновская блокада туннелирования. Коррелированный перенос заряда. Зарядовая энергия. 2 часа. Одноэлектронные колебания. Одноэлектронный бокс. Одноэлектронная ловушка. Одноэлектронные турникет и насос. 	8	4				4	4		4
2 часа. Одноэлектронный транзистор. Вольтамперные и модуляционные характеристики. Диаграмма стабильности. Симметричный и асимметричный транзисторы. Тепловые и	32	16				16	16		16

<p>квантовые флуктуации. Порог зарядовой чувствительности.</p> <p><i>2 часа.</i> Экспериментальная реализация одноэлектронных устройств. Методы формирования планарных металлических структур. Демонстрация одноэлектронного транзистора (эксперимент Фултона-Долана).</p> <p><i>2 часа.</i> Зарядовый шум. Флуктуации эффективного фонового заряда в одноэлектронных структурах. Демонстрация корреляции шумов в близкорасположенных транзисторах. Способы уменьшения зарядового шума.</p> <p><i>2 часа.</i> Эффекты взаимного влияния в близкорасположенных одноэлектронных структурах. Одноэлектронные бокс и транзистор. Тепловое и флуктуационное воздействие в системе близкорасположенных одноэлектронных транзисторов.</p> <p><i>2 часа.</i> Ассиметричный одноэлектронный транзистор. Одноэлектронный транзистор с цепочками туннельных переходов. Одноэлектронный транзистор с резистивными элементами вместо туннельных переходов.</p> <p><i>2 часа.</i> Особенности одноэлектронного транспорта в двумерных структурах на основе гранулированных металлических пленок.</p> <p><i>2 часа.</i> Сенсорные устройства на основе одноэлектронного транзистора. Одноэлектронный транзистор – полевой сенсор сканирующего зондового микроскопа. Исследование квантового эффекта Холла с помощью одноэлектронного транзистора. Детектор смещения на основе одноэлектронного транзистора.</p> <p><i>2 часа.</i> Кремниевые одноэлектронные структуры. Варианты методов изготовления. Транспортные и шумовые характеристики кремниевых структур.</p>									
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

<ul style="list-style-type: none"> • Одноатомные наноструктуры. 2 часа. Одноэлектронные структуры на основе единичных примесных атомов в твердотельной кристаллической решетке. Одноатомный транзистор. Диаграммы стабильности. Транспортные и энергетические характеристики одноатомных структур. 2 часа. Методы изготовления. Зависимость характеристик от материалов кристаллической решетки и типов примесных атомов. 	8	4					4	4		4
<ul style="list-style-type: none"> • Полевые транзисторы с каналом-нанопроводом. 2 часа. Характеристики полевого транзистора. Модификация канала полевого транзистора. Локальный полевой сенсор на основе транзистора с каналом-нанопроводом. Методы изготовления. Транспортные и шумовые характеристики. 4 часа. Биосенсоры на основе полевого транзистора с каналом-нанопроводом. Методы формирования биосенсорной системы. Основные характеристики. Чувствительность. 	12	6					6	6		6
<ul style="list-style-type: none"> • Нанoeлектромеханические системы. 2 часа. Наномеханический резонатор. Методы изготовления. Моды колебаний. Добротность. Магнитоэлектрический метод измерения характеристик резонатора. 2 часа. Сенсоры на основе наномеханических резонаторов. Считывающие устройства. 	8	4					4	4		4
Промежуточная аттестация										
Итого	68	34					34	34		34

* Текущий контроль успеваемости может быть реализован в рамках занятий семинарского типа, групповых или индивидуальных консультаций

8. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине

- Печатная версия презентации материала лекций, Программа курса,
- Список вопросов для контроля успеваемости.

9. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине.

Список вопросов для контроля успеваемости и сдачи зачета:

- Кулоновская блокада туннелирования. Условия наблюдения одноэлектронных эффектов.
- Одноэлектронный транзистор. Транспортные характеристики транзистора.
- Предел чувствительности одноэлектронного транзистора. Тепловой и квантовый шум.
- Одноэлектронный бокс и его основные характеристики.
- Шумовые характеристики одноэлектронного транзистора как сверхчувствительного электрометра.
- Флуктуации эффективного фонового заряда в одноэлектронных структурах. Их влияние на характеристики устройств.
- Одноэлектронная ловушка и ее основные характеристики.
- Способы уменьшения зарядового шума в одноэлектронных структурах.
- Тепловое и флуктуационное воздействие в системе близкорасположенных одноэлектронных транзисторов.
- Ассиметричный одноэлектронный транзистор. Его особенности.
- Одноэлектронный транзистор с резистивными элементами вместо туннельных переходов. Его особенности.
- Одноэлектронный транзистор - локальный полевой сенсор для зондовых систем.
- Одноэлектронный транзистор на основе кремния на изоляторе. Его особенности.
- Использование примесных атомов в твердотельной кристаллической решетке для создания одноэлектронных структур.
- Полевой транзистор с каналом-нанопроводом. Транспортные характеристики транзистора. Его особенности.
- Биосенсоры на основе полевого транзистора с каналом-нанопроводом.
- Наномеханический резонатор. Моды колебаний. Добротность.
- Магнитоэлектрический метод измерения характеристик наномеханического резонатора.
- Сенсоры на основе наномеханических резонаторов.
- Считывающие устройства для наномеханических систем.

Планируемые результаты обучения*	Критерии оценивания результатов обучения				
	1	2	3	4	5
ВЛАДЕТЬ: навыками анализа методологических проблем, возникающих при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях	Отсутствие навыков	Фрагментарное применение навыков анализа методологических проблем, возникающих при решении исследовательских и практических задач	В целом успешное, но не систематическое применение навыков анализа методологических проблем, возникающих при решении исследовательских и практических задач	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы применение навыков анализа методологических проблем, возникающих при решении исследовательских и практических задач	Успешное и систематическое применение навыков анализа методологических проблем, возникающих при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях
ВЛАДЕТЬ: навыками критического анализа и оценки современных научных достижений и результатов деятельности по решению исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях	Отсутствие навыков	Фрагментарное применение технологий критического анализа и оценки современных научных достижений и результатов деятельности по решению исследовательских и практических задач.	В целом успешное, но не систематическое применение технологий критического анализа и оценки современных научных достижений и результатов деятельности по решению исследовательских и практических задач.	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы применение технологий критического анализа и оценки современных научных достижений и результатов деятельности по решению исследовательских и практических задач.	Успешное и систематическое применение технологий критического анализа и оценки современных научных достижений и результатов деятельности по решению исследовательских и практических задач.

10. Перечень основной и дополнительной учебной литературы

Основная литература

- [1] D.V. Averin and K.K. Likharev, Single-Electronics: a Correlated Transfer of Single Electrons and Cooper Pairs in Systems of Small tunnel Junctions. // in Mesoscopic Phenomena in Solids, Edited by B.Al'tshuler, P.A. Lee, and R. Webb (Elsevier, Amsterdam, 1991).
- [2] K.K. Likharev, Single-Electron Devices and Their Applications. // Proc. IEEE **87**, 606–632 (1999).

Дополнительная литература

- [1] A.N. Korotkov, D.V. Averin, K.K. Likharev and S.A. Vasenko, Single electron transistors as ultrasensitive electrometers. // *Single electron tunneling and mesoscopic devices*, (ed. H. Koch, H. Lubbig) Springer series in electronics and photonics N 31 (1991).
- [2] A.N. Korotkov, Intrinsic noise of single-electron transistor. // *Phys. Rev. B.* **49** (15), 10381 (1994).
- [3]. L.J. Geerligs, V.F. Anderegg, and J.E. Mooij, Tunneling time and offset charging in small tunnel junctions. // *Physica B* **165**, 973 (1990).
- [4] E.H. Visscher, S.M. Verbrugh, J. Lindermann, P. Hadley, and J.E. Mooij, Fabrication of multilayer single-electron tunneling devices. // *Appl. Phys. Lett.* **66** (3), 305 (1995).
- [5] A.B. Zorin, F.-J. Ahlers, J. Niemeyer, T. Weimann, H. Wolf, V.A. Krupenin and S.V. Lotkhov, On the background charge noise in metallic single electron tunneling devices. // *Phys. Rev. B.* **53** (20), 13682 (1996).
- [6] P.D. Dresselhaus, J. Li, S. Han, L. Ji, J.E. Lukens, and K.K. Likharev, Measurement of single electron lifetimes in a multijunction trap. // *Phys. Rev. Lett.* **72**, 3226 (1994).
- [7] V.A. Krupenin, D.E. Presnov, A.B. Zorin, J. Niemeyer, Aluminum Single Electron Transistors with Islands Isolated from the Substrate. // *J. Low Temp. Phys.* **118**(5-6), 287 (2000).
- [8] V.A. Krupenin, A.B. Zorin, M.N. Savvateev, D.E. Presnov, J. Niemeyer, Single-electron transistor with metallic microstrips instead of tunnel junctions. // *J. Appl. Phys.*, **90** (5), 2411 (2001).
- [9] Д.Е. Преснов, С.В. Амитонов, В.С. Власенко, В.А. Крупенин. Одноэлектронный транзистор из высоколегированного кремния на изоляторе. // *Радиотехника*, **1**, 35 (2014).
- [10] Д.Е. Преснов, С.В. Амитонов, В.А. Крупенин. Полевой транзистор с каналом-нанопроводом на основе кремния на изоляторе. // *Микроэлектроника* **41** (5), 364 (2012).
- [11] Krupenin V.A., S.V. Lotkhov, H. Scherer, Th. Weimann, A.B. Zorin, F.-J. Ahlers, J. Niemeyer, H. Wolf, Charging and Heating Effects in a System of Coupled Single-electron Devices. // *Phys. Rev. B* **59**(16), 10778 (1999).
- [12] V. V. Shorokhov, D. E. Presnov, S. V. Amitonov, Yu A. Pashkin, and V. A. Krupenin. Single-electron tunneling through an individual arsenic dopant in silicon. // *Nanoscale*, **9**, 613 (2017).
- [13] Krupenin V.A., Zalunin V.O., Zorin A.B. The peculiarities of single-electron transport in granular Cr films. // *Microelectronic Engineering* **81** (2-4), 217 (2005).

11. Перечень ресурсов Интернет необходимых для освоения дисциплины:

www.phys.msu.ru

12. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины

- Печатная копия лекционной презентации, Программа курса,

- Список вопросов для контроля успеваемости и сдачи зачета.

13. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине, включая перечень программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

- Компьютерная презентация

14. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине

- Компьютер, проектор