

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «ВГУ»)

УТВЕРЖДАЮ

И.о. заведующая кафедрой
физики полупроводников и микроэлектроники


подпись

(Меньшикова Т.Г.)
расшифровка подписи

05.06.2025

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Б1.О.22 Нанозлектроника

1. Код и наименование направления подготовки/специальности:

11.03.04 Электроника и нанозлектроника

2. Профиль подготовки/специализация: Интегральная электроника и нанозлектроника

3. Квалификация (степень) выпускника: бакалавр

4. Форма обучения: очная

5. Кафедра, отвечающая за реализацию дисциплины: физики полупроводников и микроэлектроники

6. Составители программы: Бормонтов Евгений Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор

7. Рекомендована: НМС физического факультета от 04.06.2025 , протокол № 6

8. Учебный год: 2029-2030

Семестр(ы): 7

9. Цели и задачи учебной дисциплины:

Целями освоения учебной дисциплины являются: формирование систематических знаний и фундаментальных принципов, определяющих структуру квантовых низкоразмерных систем, а также в изучении явлений и процессов в наноструктурах, использующихся при разработке приборов нанoeлектроники.

Задачи учебной дисциплины:

- познакомить обучающихся с представлениями о физических идеях и принципах современной нанoeлектроники;
- формирование комплекса теоретических знаний о физических свойствах нанoeлектронных систем, важнейших физических процессах и явлениях, составляющих фундаментальную основу нанoeлектроники;
- изучение электронных свойств квантовых наноструктур, кинетических, интерференционных и мезоскопических эффектов в наноструктурах;
- формирование у обучающихся представлений об одноэлектронике, магнитные наноструктуры, спинтронике;
- знакомство обучающихся с существующими моделями, теориями различных физических явлений и основными областями применения нанoeлектронных структур.

10. Место учебной дисциплины в структуре ОПОП:

Дисциплина включена в число обязательных дисциплин блока Б1 по направлению подготовки **11.03.04 Электроника и нанoeлектроника**.

Для ее усвоения требуются знания, формируемые при освоении математических дисциплин, дисциплин общей физики, а также дисциплин: «Квантовая механика и статистическая физика», «Физика твердого тела», «Физика конденсированного состояния», «Физика полупроводников».

В результате прохождения данной дисциплины обучающийся должен приобрести знания, умения, навыки профессиональных компетенций, необходимых для обеспечения трудовых функций профессиональных стандартов 40.058 «Инженер-технолог по производству радиоэлектронных средств» и 40.035 «Инженер-конструктор аналоговых сложно-функциональных блоков (СФ-блоков)».

Знания, полученные при освоении дисциплины «Физика полупроводников», необходимы для освоения общепрофессиональных и профессиональных дисциплин: «Элементарная база цифровых интегральных схем», «Проектирование интегральных схем», а также при прохождении преддипломной практики, написания выпускной квалификационной работы в области микро- и нанoeлектроники.

11. Планируемые результаты обучения по дисциплине/модулю (знания, умения, навыки), соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями выпускников):

Компетенции		Индикаторы		Планируемые результаты обучения
Код	Наименование компетенции	Код(ы)	Наименование индикатора(ов)	
ОПК-1	Способен использовать положения, законы и методы естественных наук и математики для решения задач инженерной деятельности	ОПК-1.1	Демонстрирует знания фундаментальных законов природы и основных физических и математических законов	<i>Знать:</i> - фундаментальные законы природы и основные физические математические законы; <i>Уметь:</i> - понимать главные проблемы и задачи современной физики <i>Владеть:</i> методами естественных наук и математики в приложении к решению задач современной физики
		ОПК-1.2	Применяет физические законы и математические методы для решения задач теоретического и прикладного характера	<i>Знать:</i> - существующие теории различных физических явлений и процессов, происходящих в квантоворазмерных структурах <i>Уметь:</i> - применять физические законы и математические методы для решения задач теоретического и прикладного характера в нанoeлектронике
		ОПК-1.3	Использует положения, законы и методы естественных наук для решения инженерных задач в сфере профессиональной деятельности	<i>Знать:</i> - основные представления о физических идеях и принципах современной квантовой физики <i>Уметь:</i> - использовать полученные теоретические знания и умения для решения конкретных инженерных и прикладных задач нанoeлектроники
ОПК-2	Способен самостоятельно проводить экспериментальные исследования и использовать основные приемы обработки и представления полученных данных	ОПК-2.1	Находит и критически анализирует научно-техническую информацию, необходимую для решения поставленной задачи	<i>Знать:</i> - основные тенденции развития нанoeлектроники <i>Уметь:</i> - анализировать и учитывать современные тенденции развития нанoeлектроники <i>Владеть:</i> - основными областями применения нанoeлектронных структур
		ОПК-2.2	Определяет в рамках поставленной инженерной задачи совокупность взаимосвязанных задач, обеспечивающих	<i>Знать:</i> - явления и процессы в наноструктурах, использующихся при разработке элементов и приборов нанoeлектроники <i>Уметь:</i> - работать с технической доку-

			её достижение	ментацией - применять методы расчета параметров и характеристик приборов и устройств нанoeлектроники <i>Владеть:</i> - моделями, теориями различных физических явлений, лежащих в основе функционирования элементной базы нанoeлектроники
--	--	--	---------------	--

12. Объем дисциплины в зачетных единицах/час. — 4 / 144.

Форма промежуточной аттестации: экзамен

13. Виды учебной работы

Вид учебной работы		Трудоемкость	
		Всего	По семестрам
			7 семестр
Аудиторные занятия		48	48
в том числе:	лекции	24	24
	практические	-	-
	лабораторные	24	24
Самостоятельная работа		60	60
Форма промежуточной аттестации - экзамен		36	36
Итого:		144	144

13.1. Содержание дисциплины

п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела дисциплины	Реализация раздела дисциплины с помощью онлайн-курса, ЭУМК *
1. Лекции			
1.1	Введение. Размерное квантование. Основные типы наноструктур и их квантово-механические модели	Квантовый конфайнмент и размерность электронной системы. Размерное квантование. Условия наблюдения квантово-размерных эффектов. Элементарные наноструктуры: квантовые ямы, квантовые нити, квантовые точки, полупроводниковые сверхрешетки и их квантово-механические модели.	Размерное квантование и квантовые размеры структуры https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=11418#section-1
1.2	Электронные свойства квантовых наноструктур	Энергетический спектр и волновые функции двумерного (2D), одномерного (1D) и нульмерного (0D) электронного газа. Описание электронных состояний методом огибающей. Основные типы и энергетический спектр сверхрешеток. Модулированное легирование. Полевые транзисторы на транзисторах с высокой подвижностью. Статисти-	Свободные и связанные носители в структуре https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=11418#section-2

		ка носителей заряда в системах пониженной размерности. Размерная осцилляция плотности квантовых состояний и физических свойств 2D- электронного газа	
1.3	Кинетические эффекты в наноструктурах; Квантовый эффект Холла	Кинетические явления в двумерных структурах и сверхрешетках. Квантование Ландау и осцилляции Ванье - Штарка. Целочисленный квантовый эффект Холла (ЦКЭХ). Условия наблюдения и результаты эксперимента. Проявление мировых постоянных (e , h). Эффекты локализации и их роль в ЦКЭХ. Аргументы Лафлина. Дробный квантовый эффект Холла и его интерпретация. Структура квантовой жидкости как основного сильно коррелированного состояния двумерного электронного газа в сильном магнитном поле и свойства ее элементарных возбуждений. Дробные заряды и композитные фермионы	Кинетические явления в наноструктуре https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=11418#section-4
1.4	Интерференционные и мезоскопические эффекты в наноструктурах. Баллистический транспорт	Мезоскопические системы. Транспорт носителей в узких каналах и квантование проводимости. Квантовый точечный контакт. Роль контактов для наноструктур. Квантово- интерференционные явления и учет мезоскопических эффектов. Баллистический транспорт. Приборы на основе баллистического транспорта	-
1.5	Оптические свойства квантовых наноструктур. Гетеролазеры на квантовых ямах и квантовых точках	Оптика квантовых структур. Вероятность перехода в поле электромагнитной волны. Правила отбора. Возможность управления оптическими параметрами в широких пределах. Фотонные кристаллы. Возможность реализации лазерной генерации в непрерывном режиме при комнатной температуре. Каскадные лазеры на междюзонных переходах в системе квантовых ям и квантовых точек	-
1.6	Резонансное туннелирование и приборы на его основе	Вывод условий для реализации туннелирования с единичной вероятностью. Эффект резонансного туннелирования в двухбарьерной структуре с квантовой ямой и в многобарьерных квантовых структурах. ВАХ двух- и многобарьерных структур. Приборы на основе резонансного туннелирования.	-
1.7	Туннелирование в условиях кулоновской блокады. Одноэлектроника	Запирание туннельного тока за счет увеличения кулоновской энергии системы при добавлении одного электрона. Условия наблюдения эффекта. ВАХ асимметричного туннельного контакта без затвора. Механизм образования ступеней. Одноэлектронный транзистор. Устройства на основе одноэлектронных транзисторов. Новые типы электронных схем.	Особенности туннельного явления в наноструктурах https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=11418#section-5
1.8	Магнитные наноструктуры. Спинтроника. Перспективы наноэлектроники	Гигантское магнетосопротивление наноструктур, состоящих из чередующихся магнитных и немагнитных слоев; элементы записи, хранения и считывания информации. Инжекция спиновых токов как основа нового	Применение наноструктур в приборах микро- и наноэлек-

		класса приборов; квантовый компьютер	троники https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=11418#section-6
2. Лабораторные работы			
2.1	Размерное квантование. Основные типы наноструктур и их квантово-механические модели	Лабораторная работа №1. Расчет коэффициента пропускания одномерного квантового потенциального барьера типа «ступенька» Лабораторная работа №2. Моделирование туннельного эффекта на примере одномерного квантового прямоугольного барьера (Ч.1) Лабораторная работа №3. Моделирование туннельного эффекта на примере одномерного квантового прямоугольного барьера (Ч.2)	-
2.2	Электронные свойства квантовых наноструктур	Лабораторная работа №4. Расчет спектра разрешенных энергетических уровней одномерной квантовой прямоугольной ямы конечной глубины Лабораторная работа №7. Моделирование энергетического спектра сверхрешетки с использованием модели Кронига-Пенни (Ч.1) Лабораторная работа №8. Моделирование энергетического спектра сверхрешетки с использованием модели Кронига-Пенни (Ч.2)	-
2.3	Резонансное туннелирование и приборы на его основе	Лабораторная работа №5. Моделирование эффекта резонансного туннелирования на примере одномерной структуры из двух квантовосвязанных прямоугольных барьеров (Ч.1) Лабораторная работа №6. Моделирование эффекта резонансного туннелирования на примере одномерной структуры из двух квантовосвязанных прямоугольных барьеров (Ч.2)	-

13.2. Темы (разделы) дисциплины и виды занятий

№ п/п	Наименование темы (раздела) дисциплины	Виды занятий (часов)				
		Лекции	Практические	Лабораторные	Самостоятельная работа	Всего
1	Введение. Размерное квантование. Основные типы наноструктур и их квантово-механические модели	4	-	8	8	20
2	Электронные свойства квантовых наноструктур	4	-	8	8	20
3	Кинетические эффекты в наноструктурах; Квантовый эффект Холла	4	-		8	12
4	Интерференционные и мезоскопические эффекты в	2	-	-	8	10

	наноструктурах. Баллистический транспорт					
5	Оптические свойства квантовых наноструктур. Гетеролазеры на квантовых ямах и квантовых точках	4	-	-	8	12
6	Резонансное туннелирование и приборы на его основе	2	-	8	8	18
7	Туннелирование в условиях кулоновской блокады. Одноэлектроника	2	-	-	6	8
8	Магнитные наноструктуры. Спинтроника. Перспективы нанoeлектроники	2	-	-	6	8
	Экзамен – 36 часов					36
	Итого:	24	-	24	60	144

14. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины

Изучение дисциплины «Нанoeлектроника» предусматривает осуществление учебной деятельности состоящей из двух частей: обучения студентов преподавателем и самостоятельной учебной деятельности студентов по изучению дисциплины.

Метод преподавания – проблемный, форма обучения – групповая, форма общения – интерактивная. Обязательное посещение практических занятий и текущих аттестаций, выполнение контрольных работ.

Подготовка к лекциям является одним из видов самостоятельной работы студентов. Студентам, чтобы хорошо овладеть учебным материалом, необходимо выработать навыки правильной и планомерной работы. Перед началом лекционных занятий надо просмотреть все, что было сделано в предыдущий раз. Это позволит сосредоточить внимание и восстановить в памяти уже имеющиеся знания по данному предмету. Кроме того, такой метод поможет лучше запомнить как старое, так и новое, углубит понимание того и другого, так как при этом устанавливаются связи нового со старым, что является не только обязательным, но и основным условием глубокого овладения материалом. Чем детальнее изучаемое ассоциируется с известным ранее, тем прочнее сохраняется в памяти и быстрее вспомнить, когда требуется.

Следует помнить о том, что через лекцию передается не только систематизированный теоретический материал, но и постигается методика научного исследования и умение самостоятельно работать, анализировать различного рода явления.

Записывать на лекции необходимо главное, не стремясь зафиксировать все слово в слово. Выбрать же главное без понимания предмета невозможно. Наличие собственного конспекта лекций позволяет еще раз ознакомиться, продумать, разобраться в новом материале, так как недостаточно хорошо понятые во время лекции положения могут быть восстановлены в памяти, сопоставлены с другими, додуманы, дополнены, уяснены и расширены с помощью учебной литературы. Записи являются пособиями для повторения, дают возможность охватить содержание лекции и всего курса в целом.

При этом хорошо овладеть содержанием лекции – это:

- знать тему;
- понимать значение и важность ее в данном курсе;
- четко представлять план;
- уметь выделить основное, главное;
- усвоить значение примеров и иллюстраций;
- связать вновь полученные сведения о предмете или явлении с уже имеющимися;

- представлять возможность и необходимость применения полученных сведений.
- Существует несколько общих правил работы на лекции:
- лекции по каждому предмету записывать удобнее в отдельных тетрадях, оставляя широкие поля для пометок;
 - к прослушиванию лекций следует готовиться, что позволит в процессе лекции отделить главное от второстепенного;
 - лекции необходимо записывать с самого начала, так как оно часто бывает ключом ко всей теме;
 - так как дословно записать лекцию невозможно, то необходимо в конспекте отражать: формулы, определения, схемы, трудные места, мысли, примеры, факты и положения от которых зависит понимание главного, новое и незнакомое, неопубликованные данные, материал отсутствующий в учебниках и т.п.;
 - записывать надо сжато;
 - во время лекции важно непрерывно сохранять рабочую установку, умственную активность.

Изучение теоретического материала в данном курсе не ограничивается подготовкой к лекциям и работой на данном виде занятий. Лекционная часть курса органически взаимосвязана с иными видами работ: написанием рефератов, выполнением лабораторных работ, подготовкой и сдачей зачета по дисциплине, в структуре которых также большое значение имеет самостоятельная работа студента.

Самостоятельная работа студентов наряду с аудиторной представляет одну из форм учебного процесса и является существенной ее частью, что наиболее ярко представлено в процессе подготовки бакалавров. Последнее обусловлено тем, что самостоятельная работа предназначена для формирования навыков самостоятельной работы как вообще, так и в учебной, научной деятельности, формирование и развитие способности принимать на себя ответственность, самостоятельно решать проблему, находить конструктивные решения, выход из кризисной ситуации и т.д.

Самостоятельная работа формирует самостоятельность не только как совокупность умений и навыков, но и как черту характера, играющую существенную роль в структуре личности современного специалиста высшей квалификации. Она воспитывает самостоятельность как черту характера. Никакие знания, полученные на уровне пассивного восприятия, не ставшие объектом собственной умственной или практической работы, не могут считаться подлинным достоянием человека.

Давая возможность расширять и обогащать знания, умения по индивидуальным направлениям, самостоятельная работа студента позволяет создать разносторонних специалистов. В процессе самостоятельной работы развивают творческие возможности обучающегося, при этом самостоятельная работа завершает задачи всех видов учебной работы.

Самостоятельная работа - это планируемая работа студентов, выполняемая по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия. Преподаватель, ведущий занятия, организует, направляет самостоятельную работу студентов и оказывает им необходимую помощь. Однако самостоятельность студентов должна превышать объем работы, контролируемой преподавателем работы, и иметь в своей основе индивидуальную мотивацию обучающегося по получению знаний, необходимых и достаточных для будущей профессиональной деятельности в избранной сфере. Преподаватель при необходимости может оказывать содействие в выработке и коррекции данной мотивации, лежащей в основе построения самостоятельной деятельности студента по изучению дисциплины, получению необходимых знаний и навыков.

Основой самостоятельной работы служит научно-теоретический курс, комплекс полученных студентом знаний. Основной, наиболее экономичной формой получения и усвоения информации, теоретических знаний в вузе является лекция, позволяющая воспринять значительную сумму основных знаний и потому способствующая повышению продуктивности всех других форм учебного труда.

Результат обучения и самостоятельной работы студента предполагает наличие следующих составляющих: понимание методологических основ построения изучаемых знаний; выделение главных структур учебного курса; формирование средств выражения в данной области; построение методик решения задач и ориентации в проблемах (ситуациях).

Самостоятельная работа студента при изучении курса «Нанoeлектроника» включает в себя: подготовку и участие в изучении теоретической части курса, подготовку к практическим занятиям, подготовку к экзамену.

15. Перечень основной и дополнительной литературы, ресурсов интернет, необходимых для освоения

а) основная литература:

№ п/п	Источник
1	Драгунов В.П. Микро- и нанoeлектроника / В.П. Драгунов ; Остертак Д. И. — Новосибирск : НГТУ, 2012 .— 38 с. // Электронно-библиотечная система. — URL : http://biblioclub.ru
2	Троян П.Е. Нанoeлектроника / П.Е. Троян ; Сахаров Ю. В. — Томск : Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2010 .— 88 с. // Электронно-библиотечная система. — URL : http://biblioclub.ru
3	Щука А.А. Нанoeлектроника / А.А. Щука .— 2-е изд. (эл.) .— Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012 .— 349 с. // Электронно-библиотечная система. — URL : http://biblioclub.ru
4	Борисенко В.Е. Нанoeлектроника: теория и практика / В.Е. Борисенко .— 3-е изд. (эл.) .— Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013 .— 371 с. — (Учебник для высшей школы) . // Электронно-библиотечная система. — URL : http://biblioclub.ru
5	Шишкин, Г.Г. Нанoeлектроника. Элементы, приборы, устройства / Г.Г. Шишкин ; Агеев И. М. — 2-е изд. (эл.) .— Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012 .— 413 с. // Электронно-библиотечная система. — URL : http://biblioclub.ru

б) дополнительная литература:

№ п/п	Источник
6	Грундман М. Основы физики полупроводников. Нанofизика и технические приложения = The Physics of semiconductors. An introduction including nanophysics and applications / М. Грундман ; [пер.с англ. : И.В. Ванюшина и др.] ; под ред. В.А. Гергеля .— 2-е изд. — Москва : Физматлит, 2012 .— 771 с.
7	Ю П. Основы физики полупроводников / П. Ю, М. Кардона ; Пер. И.И. Решиной; Под ред. Б.П. Захарченя .— 3-е изд. — М. : Физматлит, 2002 .— 560 с.
8	Кульчицкий Н.А. Полупроводниковые сверхрешетки: свойства, применение : Учеб. пособие / Н. А. Кульчицкий, А. А. Мельников, А. В. Войцеховский; М-во образования Рос. Федерации. Моск. гос. ин-т радиотехники, электроники и автоматики (техн. ун-т). - М. : Моск. гос. ин-т радиотехники, электроники и автоматики (техн. ун-т), 2000. - 79 с.
9	Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктуры / Под ред. Л. Ченга, К. Плога; Пер. с англ. Ж.И. Алферова, Ю.В. Шмарцева .— М. : Мир, 1989 .— 581 с.
10	Бормонтов Е.Н. Физика и метрология МДП структур. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1997.- 184 с.
11	Драгунов В.П. Основы нанoeлектроники : учебное пособие для студ. вузов, обуч. по направлению "Электроника и микроэлектроника", специальностям "Микроэлектроника и твердотельная электроника" и "Микросистемная техника" / В. П. Драгунов, И. Г. Неизвестный, В. А. Гридчин .— М. : Физматкнига : Логос, 2006 .— 494 с.
12	Физика низкоразмерных систем : Учебное пособие для студ. вузов / А. Я. Шик, Л. Г. Бакуев, С. Ф. Мусихин, С. А. Рыков; Под общ.ред. В.И.Ильина, А. Я. Шика .— СПб. : Наука, 2001 .— 154 с.
13	Демиховский В.Я. Физика квантовых низкоразмерных структур / В. Я. Демихов-

	ский, Г. А. Вугальтер .— М. : Логос, 2000 .— 246 с.
14	Кравченко А.Ф. Электронные процессы в твердотельных системах пониженной размерности / А. Ф. Кравченко, В. Н. Овсянко .— Новосибирск : Изд-во Новосиб.ун-та, 2000 .— 447 с.

в) информационные электронно-образовательные ресурсы (официальные ресурсы интернет)*:

№ п/п	Источник
15	Портал Электронный университет ВГУ < https://edu.vsu.ru >
16	http://www.lib.vsu.ru – ЗНБ ВГУ
17	Электронная библиотека учебно-методических материалов ВГУ http://www.lib.vsu.ru/cgi-bin/zgate?Init+lib.xml,simple.xml+rus
18	Сайт www.aiportal.ru Портал искусственного интеллекта
19	Физические основы кремниевой наноэлектроники [Электронный ресурс] : учебное пособие для вузов / Г. И. Зебрев. — 3-е изд. (эл.). — Электрон. текстовые дан. (1 файл pdf : 243 с.). — М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. — (Нанотехнологии).

16. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы

№ п/п	Источник
1	Изучение углеродных нанотрубок методом сканирующей электронной микроскопии : учебно-методическое пособие для вузов : [для студ. 3 к. днев. отд-ния, для специальности: 010803 - Микроэлектроника и полупроводниковые приборы; направления 210600 - Нанотехнология] / Воронеж. гос. ун-т ; сост.: Ю.В. Соколов, Л.А. Битюцкая, Е.Н. Бормонтаев .— Воронеж : ИПЦ ВГУ, 2010 .— 23 с. : ил. — Библиогр.: с.23.
2	Яковенко Н.В. Самостоятельная работа студентов : методические рекомендации / Н. В. Яковенко, О.Ю. Сушкова .— Воронеж, 2015 .— 22 с.

17. Образовательные технологии, используемые для реализации учебной дисциплины, включая дистанционные образовательные технологии (ДОТ), электронное обучение (ЭО), смешанное обучение:

Реализация дисциплины с применением электронного обучения и дистанционных образовательных технологий осуществляется через образовательный портал "Электронный университет ВГУ", курс «Наноэлектроника»: <https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=11418>

18. Материально-техническое обеспечение дисциплины:

Учебная аудитория для проведения занятий лекционного типа - мультимедийный кабинет кафедры ФППиМЭ: Стационарный мультимедийный проектор AcerX125H – 1 шт., ноутбук emachines e510 – 1 шт.; учебный фильм «На пути к нанотехнологиям» (Microsoft Windows 7, договор 3010-15/207-19 от 30.04.2019)

Лаборатория вычислительных систем и математического моделирования: Сервер на базе 2-х процессоров Xeon E5-2620 v3. – 1 шт., компьютеры HPProDesk 400 G6 SFF – 9 шт., компьютеры PentiumDualCore - 2 шт. (Microsoft Windows 7, Windows 10 договор 3010-15/207-19 от 30.04.2019)

Аудитория для самостоятельной работы студентов: Сервер на базе 2-х процессоров Xeon E5-2620 v3. – 1 шт., компьютеры HPProDesk 400 G6 SFF – 9 шт., компьютеры PentiumDualCore - 2 шт. , подключенные к сети Интернет и с обеспечением доступа к электронной информационно-образовательной среде ВГУ (Microsoft Windows 7, Windows 10 договор 3010-15/207-19 от 30.04.2019)

19. Оценочные средства для проведения текущей и промежуточной аттестаций

Порядок оценки освоения обучающимися учебного материала определяется содержанием следующих разделов дисциплины:

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Компетенция	Индикаторы достижения компетенции	Оценочные средства
1	Введение. Размерное квантование. Основные типы наноструктур и их квантово-механические модели	ОПК-1	ОПК-1.1 ОПК-1.2	лаб. работы 1-3
2	Электронные свойства квантовых наноструктур	ОПК-1	ОПК-1.2 ОПК-1.3	лаб. работы 4-8
3	Кинетические эффекты в наноструктурах; Квантовый эффект Холла	ОПК-1	ОПК-1.2 ОПК-1.3	лаб. работы 2-4
4	Интерференционные и мезоскопические эффекты в наноструктурах. Баллистический транспорт	ОПК-1 ОПК-2	ОПК-1.2 ОПК-1.3 ОПК-2.1	лаб. работы 2-4
5	Оптические свойства квантовых наноструктур. Гетеролазеры на квантовых ямах и квантовых точках	ОПК-1 ОПК-2	ОПК-1.3 ОПК-2.1	лаб. работы 2-4
6	Резонансное туннелирование и приборы на его основе	ОПК-1 ОПК-2	ОПК-1.3 ОПК-2.1 ОПК-2.2	лаб. работы 5, 6
7	Туннелирование в условиях кулоновской блокады. Одноэлектроника	ОПК-2	ОПК-2.1 ОПК-2.2	лаб. работы 5, 6
8	Магнитные наноструктуры. Спинтроника. Перспективы нанoeлектроники	ОПК-1 ОПК-2	ОПК-1.1 ОПК-2.1	лаб. работы 1-3
Промежуточная аттестация: форма контроля - экзамен				Комплект КИМ

20. Типовые оценочные средства и методические материалы, определяющие процедуры оценивания

20.1 Текущий контроль успеваемости

Для текущего контроля успеваемости используется устный опрос, отчеты о ходе выполнения контрольных и лабораторных работ. Промежуточная аттестация по дисциплине – экзамен. В приложение к диплому вносится оценка *отлично/хорошо/удовлетворительно*.

Оценка уровня освоения дисциплины «Нанoeлектроника» осуществляется по следующим показателям:

- выполнение заданий практических работ;
- качество и своевременность выполнения лабораторных работ;
- полнота ответов на вопросы контрольно-измерительного материала;
- полнота ответов на дополнительные вопросы.

Критерии оценки освоения дисциплины «Нанoeлектроника»:

– оценка «*отлично*» выставляется при полном соответствии работы студента всем вышеуказанным показателям. Соответствует высокому (углубленному) уровню сформированности компетенций: компетенции сформированы полностью, проявляются и используются систематически, в полном объеме. Данный уровень превосходит, по крайней мере, по одному из перечисленных выше показателей повышенный (продвинутый) уровень;

– оценка «*хорошо*» выставляется в случае, если работа студента при освоении дисциплины не соответствует одному из перечисленных показателей или в случае предоставления отчетов по лабораторным работам позже установленного срока. Соответствует повышенному (продвинутому) уровню сформированности компетенций: компетенции в целом сформированы, но проявляются и используются фрагментарно, не в полном объеме. Данный уровень превосходит, по крайней мере, по одному из перечисленных выше показателей пороговый (базовый) уровень;

– оценка «*удовлетворительно*» выставляется в случае, если работа студента при освоении дисциплины не соответствует любым двум из перечисленных показателей. Соответствует пороговому (базовому) уровню сформированности компетенций: компетенции сформированы в общих чертах, проявляются и используются ситуативно, частично. Данный уровень обязателен для всех осваивающих основную образовательную программу;

– оценка «*неудовлетворительно*» выставляется в случае несоответствия работы студента всем показателям, его неорганизованности, безответственности и низкого качества работы при выполнении лабораторных работ, предусмотренных программой дисциплины.

Факт невыполнения требований, предъявляемых к студенту при освоении дисциплины «Нанозлектроника» и отраженных в вышеперечисленных критериях, фиксируется в ведомости оценкой *неудовлетворительно*.

Если студент не осваивает дисциплину в установленном программой объеме и в сроки, определенные графиком учебного процесса, он не допускается к промежуточной аттестации по данному виду учебной работы.

Критерии оценивания компетенций	Уровень сформированности компетенций	Шкала оценок
Обучающийся в полной мере владеет понятийным аппаратом данной области науки (теоретическими основами дисциплины), способен иллюстрировать ответ примерами, фактами, данными научных исследований, применять теоретические знания для решения практических задач	Повышенный уровень	Отлично
Обучающийся владеет понятийным аппаратом данной области науки (теоретическими основами дисциплины), допускает незначительные ошибки при выполнении практических задач	Базовый уровень	Хорошо
Обучающийся владеет частично теоретическими основами дисциплины, фрагментарно способен выполнять практические задания	Пороговый уровень	Удовлетворительно
Ответ на контрольно-измерительный материал не соответствует любым трем (четырем) из перечисленных показателей. Обучающийся демонстрирует отрывочные, фрагментарные знания, допускает грубые ошибки при проектировании практических задач	–	Неудовлетворительно

19.3 Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующие этапы формирования компетенций в процессе освоения образовательной программы

Перечень вопросов к экзамену (Комплект КИМ):

Контрольно-измерительный материал № 1

1. Основные типы низкоразмерных структур. Квантовые ямы, нити, точки. Полупроводниковые сверхрешетки.
2. Эффект резонансного туннелирования. Условия реализации туннелирования с единичной вероятностью.

Контрольно-измерительный материал № 2

1. Полупроводниковые структуры с двумерным электронным газом (МДП-структуры, одиночные и двойные гетероструктуры, δ -слои).
2. ВАХ двухбарьерной квантовой структуры. Резонансно-туннельные диоды и транзисторы.

Контрольно-измерительный материал № 3

1. Принцип размерного квантования.
2. Резонансно-туннельный транзистор на квантовой точке.

Контрольно-измерительный материал № 4

1. Условия наблюдения квантово-размерных эффектов.
2. Осцилляции Ванье-Штарка в полупроводниковых сверхрешетках. ВАХ многобарьерных квантовых структур.

Контрольно-измерительный материал № 5

1. Энергетический спектр электронов в двумерных системах
2. Резонансное туннелирование в сверхрешетках. ВАХ многобарьерных квантовых структур.

Контрольно-измерительный материал № 6

1. Энергетический спектр электронов в одно- и нульмерных системах.
2. Кулоновская блокада туннелирования. Условия наблюдения эффекта.

Контрольно-измерительный материал № 7

1. Плотность квантовых состояний в двумерной электронной системе.
2. ВАХ асимметричной системы из двух туннельных контактов в условиях кулоновской блокады. Механизм образования ступеней «кулоновской лестницы».

Контрольно-измерительный материал № 8

1. Плотность состояний в одномерной и нульмерной электронных системах.
2. Одноэлектроника (основные идеи).

Контрольно-измерительный материал № 9

1. Концентрация носителей заряда в двумерной системе.
2. Спинтроника. Общая характеристика устройств, использующих спин-эффекты.

Контрольно-измерительный материал № 10

1. Концентрация носителей заряда в одномерной системе.
2. Гигантское магнетосопротивление и туннельное магнетосопротивление. Спиновый клапан.

Контрольно-измерительный материал № 11

1. Осцилляции плотности состояний в тонкой пленке при изменении её толщины. Размерные явления.
2. Биполярный спиновый транзистор.

Контрольно-измерительный материал № 12

1. Энергетический спектр и плотность состояний двумерных электронных систем в квантующем магнитном поле.
2. Спиновый полевой транзистор.

Контрольно-измерительный материал № 13

1. Целочисленный квантовый эффект Холла. Общие сведения. Условия наблюдения и результаты эксперимента. Проявление мировых постоянных (e , h).
2. Эффект «всплеска» дрейфовой скорости. Баллистический транспорт.

Контрольно-измерительный материал № 14

1. Интерпретация целочисленного квантового эффекта Холла (ЦКЭХ). Эффекты локализации и их роль в ЦКЭХ. Аргументы Лафлина.
2. Устройства, использующие особенности баллистического транспорта в двумерных структурах.

Контрольно-измерительный материал № 15

1. Дробный квантовый эффект Холла. Суть явления, условия наблюдения и его качественная интерпретация. Композитные фермионы.
2. Гетеролазеры с квантовыми ямами и квантовыми точками

Перечень лабораторных работ:

- Лабораторная работа №1. Расчет коэффициента пропускания одномерного квантового потенциального барьера типа «ступенька»
- Лабораторная работа №2. Моделирование туннельного эффекта на примере одномерного квантового прямоугольного барьера (Ч.1)
- Лабораторная работа №3. Моделирование туннельного эффекта на примере одномерного квантового прямоугольного барьера (Ч.2)

Лабораторная работа №4. Расчет спектра разрешенных энергетических уровней одномерной квантовой прямоугольной ямы конечной глубины

Лабораторная работа №5. Моделирование эффекта резонансного туннелирования на примере одномерной структуры из двух квантовосвязанных прямоугольных барьеров (Ч.1)

Лабораторная работа №6. Моделирование эффекта резонансного туннелирования на примере одномерной структуры из двух квантовосвязанных прямоугольных барьеров (Ч.2)

Лабораторная работа №7. Моделирование энергетического спектра сверхрешетки с использованием модели Кронига-Пенни (Ч.1)

Лабораторная работа №8. Моделирование энергетического спектра сверхрешетки с использованием модели Кронига-Пенни (Ч.2)

Оценка знаний, умений и навыков, характеризующая этапы формирования компетенций в рамках изучения дисциплины осуществляется в ходе текущей и промежуточной аттестаций.

Текущая аттестация проводится в соответствии с Положением о текущей аттестации обучающихся по программам высшего образования Воронежского государственного университета. Текущая аттестация проводится в формах: *устного опроса (индивидуальный опрос); выполнение лабораторных работ*. Критерии оценивания приведены выше.

Промежуточная аттестация проводится в соответствии с Положением о промежуточной аттестации обучающихся по программам высшего образования.

Контрольно-измерительные материалы промежуточной аттестации включают в себя теоретические вопросы, позволяющие оценить уровень полученных знаний, позволяющие оценить степень сформированности умений, навыков, и опыт деятельности в условиях производства изделий электронной техники.

При оценивании используются количественные шкалы оценок. Критерии оценивания приведены выше.

ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ по учебной дисциплине

Б1.О.22 Нанoeлектроника

Код и наименование дисциплины в соответствии с учебным планом

Освоение данной дисциплины направлено на формирование следующих компетенций

Компетенции		Индикаторы		Планируемые результаты обучения
Код	Наименование компетенции	Код(ы)	Наименование индикатора(ов)	
ОПК-1	Способен использовать положения, законы и методы естественных наук и математики для решения задач инженерной деятельности	ОПК-1.1	Демонстрирует знания фундаментальных законов природы и основных физических и математических законов	<i>Знать:</i> - фундаментальные законы природы и основные физические математические законы; <i>Уметь:</i> - понимать главные проблемы и задачи современной физики <i>Владеть:</i> методами естественных наук и

				математики в приложении к решению задач современной физики
		ОПК-1.2	Применяет физические законы и математические методы для решения задач теоретического и прикладного характера	<i>Знать:</i> - существующие теории различных физических явлений и процессов, происходящих в квантоворазмерных структурах <i>Уметь:</i> - применять физические законы и математические методы для решения задач теоретического и прикладного характера в нанoeлектронике
		ОПК-1.3	Использует положения, законы и методы естественных наук для решения инженерных задач в сфере профессиональной деятельности	<i>Знать:</i> - основные представления о физических идеях и принципах современной квантовой физики <i>Уметь:</i> - использовать полученные теоретические знания и умения для решения конкретных инженерных и прикладных задач нанoeлектроники
ОПК-2	Способен самостоятельно проводить экспериментальные исследования и использовать основные приемы обработки и представления полученных данных	ОПК-2.1	Находит и критически анализирует научно-техническую информацию, необходимую для решения поставленной задачи	<i>Знать:</i> - основные тенденции развития нанoeлектроники <i>Уметь:</i> - анализировать и учитывать современные тенденции развития нанoeлектроники <i>Владеть:</i> - основными областями применения нанoeлектронных структур
		ОПК-2.2	Определяет в рамках поставленной инженерной задачи совокупность взаимосвязанных задач, обеспечивающих её достижение	<i>Знать:</i> - явления и процессы в наноструктурах, использующихся при разработке элементов и приборов нанoeлектроники <i>Уметь:</i> - работать с технической документацией - применять методы расчета параметров и характеристик приборов и устройств нанoeлектроники <i>Владеть:</i> - моделями, теориями различных физических явлений, лежащих в основе функционирования элементной базы нанoeлектроники

Перечень заданий для оценки уровня освоения дисциплины:

1) _____ те-
стовые задания (выбор правильного(-ых) ответа(-ов) из предложенного перечня; задания на соответствие):

ЗАДАНИЕ 1.1. Выберите правильный вариант ответа:

При каких размерах полупроводника проявляется размерное квантование,

- а) при размере меньше одного микрона;
- б) при размере меньше одного нанометра;
- в) когда размер становится порядка длины волны де-Бройля электрона ;
- г) когда размер становится меньше одного миллиметра.**

ЗАДАНИЕ 1.2. Выберите правильный вариант ответа:

Как зависит энергия электрона от ширины квантовой ямы?

- а) вообще не зависит;
- б) увеличивается линейно с увеличением ширины квантовой ямы;
- в) увеличивается обратно пропорционально квадрату ширины квантовой ямы с уменьшением последней;**
- г) уменьшается линейно с уменьшением ширины квантовой ямы.

ЗАДАНИЕ 1.3. Выберите правильный вариант ответа:

Как зависит электронная плотность состояний от энергии в одномерных полупроводниках?

- а) квадратично;
- б) обратно пропорционально;
- в) линейно;
- г) обратно пропорционально корню квадратному от энергии.**

ЗАДАНИЕ 1.4. Выберите правильный вариант ответа:

От чего зависит проводимость инверсионного слоя на поверхности полупроводника?

- а) от напряжения сток–исток;
- б) от толщины окисла на поверхности;
- в) от напряжения затвора
- в) от всего выше перечисленного.**

ЗАДАНИЕ 1.5. Выберите правильный вариант ответа:

Как зависит длина экранирования от концентрации электронов в невырожденном газе 2D-случая?

- а) обратно пропорционально корню квадратному от концентрации;**
- б) линейно;
- в) экспоненциально;
- д) осциллирует.

ЗАДАНИЕ 1.6. Выберите правильный вариант ответа:

Чем определяется энергия электронов в магнитном поле для 2D-случая?:

- а) эффективной массой электрона;
- б) индукцией магнитного поля B ;
- в) циклотронной частотой ω_c ;
- г) всеми этими параметрами .**

ЗАДАНИЕ 1.7. Выберите правильный вариант ответа:

Чем определяется квантовое сопротивление Холла?

- а) наличием локализованных уровней в двумерном газе;
- б) наличием ряда эквидистанционных уровней;

- в) наличием уровней Ландау;
- г) наличием заполненных уровней Ландау.**

ЗАДАНИЕ 1.8. Выберите правильный вариант ответа:

В каких полупроводниковых структурах наблюдается квантовый эффект Холла?:

- а) в гетероструктурах;
- б) в квантовых ямах;
- в) в сверхрешётках;
- г) во всех перечисленных структурах.**

ЗАДАНИЕ 1.9. Выберите правильный вариант ответа:

Чем определяется квант сопротивления?

- а) постоянной Планка;
- б) зарядом электрона;
- в) постоянной Планка, делённой на квадрат заряда электрона;**
- г) зарядом электрона, делённым на квадрат постоянной Планка.

ЗАДАНИЕ 1.10. Выберите правильный вариант ответа:

Энергия размерного квантования в легированной сверхрешётке определяется:

- а) уровнем легирования и толщиной слоёв;**
- б) циклотронной частотой;
- в) плазменной частотой;
- г) отношением плазменной и циклотронной частот.

ЗАДАНИЕ 1.11. Выберите правильный вариант ответа:

Легированные сверхрешётки создаются:

- а) последовательным планарным легированием донорной и акцепторной примесью одного полупроводника;**
- б) чередованием двух разных полупроводников с донорным легированием;
- в) последовательным планарным легированием донорной примесью с увеличивающимся уровнем одного полупроводника;
- г) чередованием двух разных полупроводников с акцепторным легированием.

ЗАДАНИЕ 1.12. Выберите правильный вариант ответа:

Сопротивление баллистического проводника возникает:

- а) из-за рассеяния электронов на примесях в нём;**
- б) из-за рассеяния электронов на поверхности проводника;
- в) в контактах на конце проводника;
- г) из-за рассеяния электронов друг на друге.

ЗАДАНИЕ 1.13. Выберите правильный вариант ответа:

Какими параметрами характеризуют динамику изменения дрейфовой скорости в двумерном газе?

- а) плотностью тока;
- б) временем релаксации (по импульсу и по энергии);**
- в) величиной координаты электрона;
- г) длиной свободного пробега.

ЗАДАНИЕ 1.14. Выберите правильный вариант ответа:

Квантово-размерные уровни энергии в квантовой точке определяются:

- а) упругими напряжениями в решётке квантовой точки;
- б) размерами квантовой точки;**
- в) материалом квантовой точки;
- г) всеми этими параметрами.

ЗАДАНИЕ 1.15. Выберите правильный вариант ответа:

Если на уровне размерного квантования в многоуровневой квантовой точке есть один электрон, то второму электрону для вхождения в квантовую точку требуется

- а) в 2 раза меньшая энергия по сравнению с первым;
- б) большая энергия по сравнению с первым;
- в) такая же энергия для основного состояния;**
- г) меньшая энергия.

ЗАДАНИЕ 1.16. Выберите правильный вариант ответа:

При параболическом ограничивающем потенциале на каком расстоянии находятся уровни размерного квантования?

- а) расстояние между ними растёт как квадрат номера уровня;**
- б) расстояние между ними увеличивается линейно с ростом номера уровня;
- в) расстояние между ними уменьшается с ростом номера уровня;
- г) расстояние между ними не зависит от их номера .

2) задания с коротким ответом (ответ на задание состоит из числа, слова или словосочетания):

ЗАДАНИЕ 2.1. Чем определяется ширина мини-зоны композиционной сверхрешётки?

Ответ: периодом сверхрешётки

ЗАДАНИЕ 2.2. Как изменяется дифференциальная проводимость сверхрешётки вдоль её оси с ростом приложенного напряжения

Ответ: увеличивается

ЗАДАНИЕ 2.3. Как зависит сопротивление баллистического проводника от его длины?

Ответ: не зависит

ЗАДАНИЕ 2.4. Как зависит энергия излучения из квантовой точки при увеличении её размеров?

Ответ: не зависит

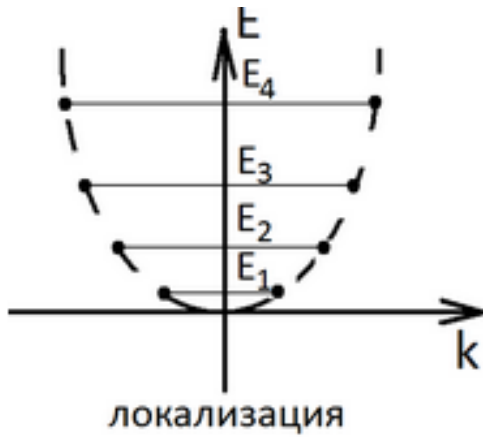
3) расчетные, ситуационные, практико-ориентированные задачи / мини-кейсы (ответ содержит решение поставленной задачи):

ЗАДАНИЕ 3.1. В чем заключается сущность размерного квантования?

Ответ: Эффект, возникающий при ограничении или лимитировании движения электронов физическими размерами области, в которой он находится, называется эффектом локализации или размерным квантованием или квантовым размерным эффектом.

Квантовый размерный эффект связан с квантованием импульса электрона. Вследствие чего непрерывный энергетический спектр электронов распадается на дискретные уровни, т.е. происходит квантование энергии спектра электрона.

В этом случае



ЗАДАНИЕ 3.2. При каких условиях наблюдаются квантовые размерные эффекты?

Ответ: Квантовые размерные эффекты начинают оказывать влияние на электронные свойства, когда размер области локализации свободных носителей становится, соизмерим с длиной волны де Бройля

$$\lambda_g = \hbar / \sqrt{2mE},$$

где m – эффективная масса электронов; E – энергия носителей; $\hbar$ – постоянная Планка

ЗАДАНИЕ 3.3. Опишите резонансно-туннельный транзистор на квантовой точке. Ответ: Транзисторы на квантовых точках представляют тип приборов на горячих электродах, весьма перспективный для СВЧ-электроники.

В гетероструктурах растят эпитаксиальный слой на подложке с другими параметрами решетки. Квантовые точки возникают в слое, если его толщина превышает некоторое критическое значение.

Подвижность и концентрация электронов в двумерном газе уменьшаются из-за наличия квантовых точек. Это означает, что квантовыми точками захватывается меньшее число электронов.

Транспорт электронов в гетероструктурах с квантовыми точками имеет две компоненты. Одна компонента формируется подвижными электронами из двумерного газа и соответствует насыщению их дрейфовой скорости, другая обусловлена электронами, локализованными в квантовых ямах. Вторая компонента дает вклад в электронный транспорт только в сильных электрических полях.

В транзисторах на квантовых точках концентрация участвующих в транспорте электронов в сильных полях не зависит от напряжения на затворе. Пороговое же напряжение, необходимое для эмиссии электронов из квантовых точек, уменьшается, когда напряжение на затворе становится отрицательным.

ЗАДАНИЕ 3.4. Что такое кулоновская блокада?

Ответ:

Кулоновская блокада — блокирование прохождения электронов через квантовую точку, включенную между двумя туннельными контактами, обусловленное отталкиванием электронов в контактах от электрона на точке, а также дополнительным кулоновским потенциальным барьером, который создаёт электрон, находящийся на точке. Аналогично тому, как поле ядерных сил при альфа распаде[1] препятствует вылету альфа-частицы, кулоновский барьер препятствует вылету электрона из точки, а также попаданию новых электронов на неё. Экспериментально кулоновская блокада проявляется как пикообразная зависимость проводимости точки

от потенциала точки, то есть от напряжения на дополнительном электроде (затворе).

ЗАДАНИЕ 3.5. Одноэлектроника. Основные принципы

Ответ: При уменьшении линейных размеров информационных электронных приборов и устройств возникает проблема манипулирования и определения состояния отдельных носителей заряда. И прежде всего электронов. Это направление развития электроники получило название «твердотельная одноэлектроника». Одноэлектронные устройства представляют собой перспективные наноэлектронные приборы, основанные на эффекте дискретного туннелирования отдельных электронов и обеспечивающие ультранизкие уровни потребляемой энергии при ультранизких рабочих напряжениях.

Критерии и шкалы оценивания:

Для оценивания выполнения заданий используется балльная шкала:

1) тестовые задания:

- 1 балл – указан верный ответ;
- 0 баллов – указан неверный ответ, в том числе частично.

2) задания с коротким ответом:

- 2 балла – указан верный ответ;
- 0 баллов – указан неверный ответ, в том числе частично.

3) расчетные задачи, ситуационные, практико-ориентированные задачи / мини-кейсы:

- 5 баллов – задача решена верно (получен правильный ответ, обоснован (аргументирован) ход решения);
- 2 балла – решение задачи содержит незначительные ошибки, но приведен правильный ход рассуждений, или получен верный ответ, но отсутствует обоснование хода ее решения, или задача решена не полностью, но получены промежуточные результаты, отражающие правильность хода решения задачи, или, в случае если задание состоит из решения нескольких подзадач, 50% которых решены верно;
- 0 баллов – задача не решена или решение неверно (ход решения ошибочен или содержит грубые ошибки, значительно влияющие на дальнейшее изучение задачи).