

**БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по учебной работе и  
образовательным инновациям

О.М. Чуприс

« 07 » 2019 г.

Регистрационный № УД-6621 /уч.

**ПРОГРАММА КОМПЛЕКСНОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭКЗАМЕНА**

**по специальности, направлению специальности, специализации**

**для специальности**

**1-31 04 07 Физика наноматериалов и нанотехнологий**

2019 г.

Учебная программа составлена на основе образовательных стандартов ОСВО 1-31 04 07-2013 утвержденного и введенного в действие постановлением Министерства образования Республики Беларусь от 30.08.2013 № 88 и учебных планов №G31-143/уч., №G31и-179/уч. от 30.05.2013, типовых программ по дисциплинам «Механика», «Молекулярная физика», «Электричество и магнетизм», «Оптика», «Физика атома и атомных явлений», «Физика ядра и элементарных частиц», «Теоретическая механика», «Электродинамика», «Квантовая механика», «Термодинамика и статистическая физика»

### **СОСТАВИТЕЛИ:**

**Н.И. Горбачук** — зам. декана физического факультета, доцент кафедры физики полупроводников и наноэлектроники БГУ, канд. физ.-мат. наук, доцент;

**А.И. Хмельницкий** — зам. декана физического факультета, доцент кафедры биофизики БГУ, канд. физ.-мат. наук, доцент;

**И.А. Солодухин** — зам. декана физического факультета, доцент кафедры общей физики БГУ, канд. физ.-мат. наук, доцент;

**Г.Г. Мартинович** — зав. кафедрой биофизики, д-р. биол. наук, доцент;

**И.Н. Медведь** — доцент кафедры общей физики БГУ, канд. физ.-мат. наук, доцент;

**А.В. Новицкий** — профессор кафедры теоретической физики и астрофизики, д-р. физ.-мат. наук, профессор;

**В.Б. Оджаев** — зав. кафедрой физики полупроводников и наноэлектроники, д-р. физ.-мат. наук, профессор.

**А.И. Слободянюк** — зав. кафедрой общей физики, канд. физ.-мат. наук, доцент;

**А.Л. Толстик** — зав. кафедрой лазерной физики и спектроскопии, д-р. физ.-мат. наук, профессор;

**Н.К. Филиппова** — доцент кафедры высшей математики и математической физики, канд. физ.-мат. наук, доцент;

**А.Н. Фурс** — зав. кафедрой теоретической физики и астрофизики, д-р. физ.-мат. наук, профессор.

### **РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:**

Методической комиссией физического факультета  
(протокол № 5 от 06.02.2019);

Научно-методическим Советом БГУ (протокол № 3 от 11.02.2019.)

## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Государственный экзамен является одной из обязательных составляющих итоговой аттестации студентов. Программа комплексного государственного экзамена по специальности, направлению специальности и специализации разработана в соответствии с требованиями государственного образовательного стандарта I степени высшего образования и Правилами проведения аттестации студентов, курсантов, слушателей при освоении содержания образовательных программ высшего образования.

Программа комплексного государственного экзамена определяет и регламентирует структуру и содержание комплексного государственного экзамена по специальности 1-31 04 07 Физика наноматериалов и нанотехнологий.

В программу комплексного государственного экзамена включаются следующие учебные дисциплины:

- цикла общенаучных и общепрофессиональных дисциплин — «Механика», «Молекулярная физика», «Электричество и магнетизм», «Оптика», «Физика атома и атомных явлений», «Физика ядра и элементарных частиц», «Теоретическая механика», «Электродинамика», «Квантовая механика», «Термодинамика и статистическая физика»;
- цикла специальных дисциплин — «Методы создания наноструктур и наноматериалов», «Инженерная графика», «Физико-химия поверхности», «Фундаментальные принципы нанотехнологий», «Методы диагностики наноструктур и наноматериалов»;
- и цикла дисциплин специализаций — 1-31 04 07 01 Нанофотоника; 1-31 04 07 02 Наноэлектроника; 1-31 04 07 05 Нанобиоматериалы и нанобиотехнологии.

Комплексный государственный экзамен проводится на заседании государственной экзаменационной комиссии.

Цель проведения комплексного государственного экзамена по специальности – выявление компетенций специалиста, т. е. теоретических знаний и практических умений, необходимых для решения теоретических и практических задач специалиста с высшим образованием.

Программа комплексного государственного экзамена носит системный, междисциплинарный характер и ориентирована на выявление у выпускника общепрофессиональных и специальных знаний и умений.

В рамках подготовки по общенаучным и общепрофессиональным дисциплинам выпускник должен:

**знать:**

- основные понятия и законы механики; законы сохранения; основы механики сплошной среды; уравнения движения в разных формулировках; основные уравнения для идеальной и вязкой жидкостей;
- общие методы измерений физических величин; статистический и термодинамический подходы к описанию термодинамических систем; основные законы и методы термодинамики; основные принципы статистической механики; микроканоническое и каноническое распределения; свойства реальных газов и жидкостей;
- основные законы электромагнитных взаимодействий; законы постоянного и переменного тока; уравнения Максвелла для полей в вакууме и сплошных средах; свойства диэлектриков и магнетиков; тензор энергии-импульса, потенциалы электромагнитного поля;
- основы электромагнитной теории света; явления интерференции и дифракции; принципы генерации света; физический механизм излучения электромагнитных волн;

- основы истории развития физики микроявлений (эксперимента и теории); основные положения и принципы квантовой механики; операторы физических величин; уравнение Шредингера; методы квантово-механического описания атомов, молекул и кристаллов;
- физическое обоснование периодической системы элементов; свойства и модели атомных ядер; свойства ядерных сил; физические принципы ядерной энергетики; основные представления об элементарных частицах и взаимодействиях;

**уметь:**

- решать задачи по кинематике, динамике, механике сплошной среды; использовать законы сохранения при решении задач; рассчитывать характеристики движения частиц в силовых полях; рассчитывать параметры колебаний механических систем в гармоническом приближении;
- выполнять расчеты термодинамических процессов; использовать статистические распределения при решении задач; обосновывать законы термодинамики методами статистической механики; решать практически важные задачи термодинамики и физической кинетики;
- рассчитывать электрические и магнитные поля в вакууме и веществе; выполнять расчет цепей квазистационарных переменных токов; использовать законы электромагнетизма при решении задач; применять уравнения Максвелла для расчета электромагнитных полей;
- решать задачи геометрической и физической оптики; анализировать практически важные схемы интерференции и дифракции;
- применять теорию Бора для оценки основных параметров атомов; применять квантово-механический подход для объяснения атомно-молекулярных явлений и расчета характеристик атомов, молекул и кристаллов; связывать характеристики атомов и молекул с их оптическими и рентгеновскими спектрами; находить собственные значения и собственные функции разных операторов физических величин для практически важных случаев;
- вычислять энергию связи ядер и энергетический выход ядерных реакций; использовать законы квантовой физики для объяснения ядерных процессов;

**владеть:**

- методами экспериментальных исследований механических явлений и процессов; методами обработки результатов экспериментальных исследований; математическими методами решения задач по механике; основными методами получения уравнений движения механических систем; общими методами решения уравнений движения;
- методами экспериментальных исследований термодинамических систем; методами обработки результатов экспериментальных исследований; математическими методами решения задач термодинамики и статистической физики;
- методами экспериментальных исследований электрических и магнитных свойств веществ; методами экспериментального исследования электрических цепей; математическими методами решения задач по электричеству и магнетизму; математическими методами электродинамики; методами расчёта электромагнитных полей
- методами экспериментальных исследований оптических явлений; – математическими методами решения задач по оптике.
- терминологией физики микроявлений; навыками проведения экспериментальных исследований атомно-молекулярных явлений; математическими методами решения задач атомной физики; приближенными методами описания квантовомеханических систем
- методами расчета характеристик радиоактивного распада и ядерных реакций; методами анализа кинематических характеристик ядерных процессов.

В рамках подготовки по специальным дисциплинам выпускник должен:

**знать:**

- основные принципы систем автоматизированного проектирования и компьютерной графики;
- основные свойства поверхностей, методы формирования и исследования поверхностей;
- основные методы исследования наноматериалов, их классификацию, особенности применения для различных типов наноструктур, новейшие достижения в области диагностики наноструктур и наноматериалов;
- физико-химические принципы современных технологий создания низкоразмерных систем и формирования на их основе наноматериалов и элементов приборных структур.

**уметь:**

- проводить анализ и моделирование электронных микросхем;
- интерпретировать результаты исследования структурных и функциональных свойств наноматериалов, устанавливать с использованием различных методов структурного анализа возможные причины изменения свойств наноматериалов;
- на основе результатов анализа элементного и фазового состава, структуры выбирать возможные пути, меры и средства управления свойствами наноматериалов;
- ориентироваться в аппаратно-техническом обеспечении технологических процессов, планировать технологические эксперименты;
- рассчитывать основные параметры технологических процессов формирования и модификации атомных кластеров, фуллеренов, углеродных нанотрубок, тонких нитей и пленок.

**владеть:**

- методами компьютерного моделирования электронных микросхем.
- методами расчета основных характеристик кристаллов и структур в приповерхностной области.
- основными принципами и методами исследования наноструктур и наноматериалов;
- основными приемами обработки результатов микроскопических, спектроскопических и дифракционных исследований, результатов анализа структуры и функциональных свойств наноматериалов.
- основными методами оценки условий термодинамического равновесия и расчета кинетических коэффициентов в процессах с низкоразмерными системами;
- информацией по аппаратно-техническому обеспечению технологических процессов создания наноструктур и наноматериалов.
- методиками расчета параметров технологических процессов формирования наноструктур.

Освоение образовательной программы специальности 1-31 04 07 Физика наноматериалов и нанотехнологий должно обеспечить формирование следующих академических, социально-личностных и профессиональных компетенций

**Академические** компетенции:

Уметь применять базовые научно-теоретические знания для решения теоретических и практических задач.

Владеть системным и сравнительным анализом.

Владеть исследовательскими навыками.

Уметь работать самостоятельно.

Быть способным выработать новые идеи (креативность).

Владеть междисциплинарным подходом при решении проблем.

Иметь навыки, связанные с использованием технических устройств, управлением информацией и работой с компьютером.

Иметь лингвистические навыки (устная и письменная коммуникация).

Уметь учиться, повышать свою квалификацию в течение всей жизни.

***Социально-личностные*** компетенции:

Обладать качествами гражданственности.

Быть способным к социальному взаимодействию.

Обладать способностью к межличностным коммуникациям.

Владеть навыками здорового образа жизни.

Быть способным к критике и самокритике (критическое мышление).

Уметь работать в команде.

***Профессиональные*** компетенции:

Применять знания теоретических и экспериментальных основ физики наноматериалов и нанотехнологий, методов исследования физических объектов, методов измерения физических величин, методов автоматизации эксперимента, методов планирования, организации и ведения научно-производственной, научно-педагогической, производственно-технической, опытно-конструкторской работы.

Осуществлять на основе методов математического моделирования оценку эксплуатационных параметров функциональных наноматериалов и технологических процессов их получения.

Пользоваться компьютерными методами сбора, хранения и обработки информации, системами автоматизированного программирования, научно-технической и патентной литературой.

Взаимодействовать со специалистами смежных профилей.

Применять полученные знания фундаментальных положений физики, экспериментальных, теоретических и компьютерных методов исследования, планирования, организации и ведения научно-технической и научно-педагогической работы.

Использовать новейшие открытия в естествознании, методы научного анализа, информационные образовательные технологии, физические основы современных технологических процессов, включая нанотехнологии.

Вести переговоры, разрабатывать планы сотрудничества с другими организациями.

Пользоваться государственными языками Республики Беларусь и иными иностранными языками как средством делового общения.

Пользоваться глобальными информационными ресурсами.

Реализовывать методы защиты производственного персонала и населения в условиях возникновения аварий, катастроф, стихийных бедствий и обеспечения радиационной безопасности при осуществлении научной, производственной и педагогической деятельности.

## ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭКЗАМЕНА

Экзамен (ответы студентов и беседа с экзаменуемым) проводится на русском или белорусском языке.

В ходе подготовки экзаменуемые имеют право использовать учебные программы соответствующих дисциплин, научную и справочную литературу.

На подготовку к ответу обучающемуся отводится не менее 30 минут (но не более 1 астрономического часа). Время, которое отводится на ответ одного экзаменуемого, – до 30 минут.

### **Структура экзаменационного билета**

Вопросы экзаменационного билета по учебным дисциплинам «Механика», «Молекулярная физика», «Электричество и магнетизм», «Оптика», «Физика атома и атомных явлений», «Физика ядра и элементарных частиц», «Теоретическая механика», «Электродинамика», «Квантовая механика», «Термодинамика и статистическая физика», «Методы создания наноструктур и наноматериалов», «Инженерная графика», «Физико-химия поверхности», «Фундаментальные принципы нанотехнологий», «Методы диагностики наноструктур и наноматериалов», а также дисциплинам специализаций 1-31 04 07 01 Нанопотоника; 1-31 04 07 02 Нанозлектроника; 1-31 04 07 05 Нанобиоматериалы и нанобиотехнологии отражают содержание образовательной программы по специальности 1-31 04 07 Физика наноматериалов и нанотехнологий.

Экзаменационный билет состоит из двух частей: теоретической (2 вопроса) и практической (1 задание). В практическую часть включены задания исследовательского типа, ситуационные задания, мини кейсы и т.п. по циклам дисциплин специализаций, позволяющие оценить полученные в процессе обучения знания и практические навыки.

Характеристика теоретической части: первый вопрос билета относится к дисциплинам общей и теоретической физики (раздел 1 теоретической части), второй вопрос билета — к дисциплинам специальности (раздел 2 теоретической части).

Содержание практической части экзаменационного билета соответствует программам циклов дисциплин специализации (раздел 1 практической части). Примеры заданий представлены в разделе 2 практической части.

# СОДЕРЖАНИЕ ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭКЗАМЕНА

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### Раздел 1. ОБЩАЯ И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

#### МЕХАНИКА

##### ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА

1. **Кинематика материальной точки.** Способы описания движения материальной точки. Система отсчета. Траектория и длина пути. Вектор перемещения. Скорость. Ускорение.

2. **Основная задача динамики. Законы Ньютона.** Первый закон Ньютона. Инерциальные системы отсчета. Сила, масса, импульс. Второй закон Ньютона. Принцип независимости действия сил. Третий закон Ньютона.

3. **Принцип наименьшего действия. Уравнения Лагранжа.** Формулировка принципа наименьшего действия. Необходимое условие экстремальности действия. Уравнения Лагранжа. Свойства функции Лагранжа (аддитивность, эквивалентность, невырожденность). Нахождение закона движения механической системы методом Лагранжа.

4. **Гамильтонова форма уравнений механики.** Переменные состояния в гамильтоновой механике. Фазовое пространство. Связь между функциями Лагранжа и Гамильтона. Физический смысл функции Гамильтона. Канонические уравнения. Нахождение закона движения механической системы методом Гамильтона.

5. **Фундаментальные законы сохранения в классической механике.** Связь законов сохранения со свойствами симметрии пространства и времени. Определения однородности и изотропности пространства и времени. Закон сохранения энергии и его связь с однородностью времени. Закон сохранения импульса и его связь с однородностью пространства. Закон сохранения момента импульса и его связь с изотропностью пространства.

6. **Движение в центральном силовом поле.** Закон Кулона и закон всемирного тяготения. Определение центрально-симметричного поля. Свойства силы, действующей на частицу в центральном поле. Сохранение момента импульса и закон площадей. Нахождение закона движения из первых интегралов движения. Общие свойства траекторий в кулоновском поле.

7. **Линейные колебания механических систем.** Свободные колебания системы с одной степенью свободы в гармоническом приближении. Частота, амплитуда и фаза колебания. Изохронность колебаний. Вынужденные колебания при отсутствии трения. Резонанс. Характеристическое уравнение. Собственные частоты колебаний. Нормальные колебания и нормальные координаты.

8. **Кинематика твердого тела.** Степени свободы твердого тела. Разложение движения твердого тела на слагаемые движения. Виды движения. Векторы угловой скорости и углового ускорения. Мгновенная ось вращения.

9. **Динамика вращательного движения. Уравнения Эйлера.** Тензор инерции, главные оси и главные моменты инерции твердого тела. Кинетическая энергия и момент импульса твердого тела. Свободное вращение шарового и симметрического волчков. Прецессия. Динамические уравнения Эйлера для вращательного движения.



## МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА ТЕРМОДИНАМИКА И СТАТИСТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

10. **Первое начало термодинамики.** Работа. Теплота. Внутренняя энергия. Физическое содержание первого начала термодинамики. Функции состояния и полные дифференциалы.

11. **Второе начало термодинамики.** Циклические процессы. Работа цикла. Коэффициент полезного действия тепловой машины. Цикл Карно. Теоремы Карно. Формулировки Клаузиуса и Кельвина второго начала термодинамики.

12. **Энтропия.** Неравенство Клаузиуса. Энтропия. Энтропия идеального газа, ее физический смысл и расчет в процессах идеального газа. Формулировка второго начала термодинамики с помощью энтропии. Статистический характер второго начала термодинамики. Изменение энтропии в необратимых процессах.

13. **Фазовые состояния и фазовые превращения.** Переход из газообразного состояния в жидкое. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса. Кристаллизация и плавление. Кристаллизация и сублимация. Фазовые диаграммы. Фазовые переходы первого и второго рода.

14. **Статистические распределения.** Распределение Больцмана, Максвелла, Гиббса. Распределения Бозе-Эйнштейна и Ферми-Дирака.

15. **Термодинамические потенциалы.** Преобразование производных термодинамических величин. Системы с переменным числом частиц. Химический потенциал. Термодинамические неравенства.

## ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

16. **Электростатическое поле в вакууме.** Электрическое поле. Напряженность и потенциал электрического поля. Основная задача электростатики. Энергия электрического поля.

17. **Электростатическое поле при наличии проводников и диэлектриков.** Поле заряженного проводника. Механизмы поляризации полярных и неполярных диэлектриков. Вектор поляризованности.

18. **Стационарное магнитное поле.** Закон Ампера. Теорема Био-Савара-Лапласа. Вихревой характер магнитного поля. Контур с током в магнитном поле. Энергия магнитного поля.

19. **Магнитные свойства вещества.** Вектор и токи намагничивания. Природа диамагнетизма, парамагнетизма и ферромагнетизма.

20. **Электрический ток и его поле.** Характеристики тока. Уравнение непрерывности. Законы стационарного тока. Критерий квазистационарности тока.

21. **Электромагнитное поле. Уравнения Максвелла.** Явление электромагнитной индукции (закон Фарадея). Сила Лоренца. Вихревое электрическое поле. Ток смещения. Уравнения Максвелла и их физический смысл.

22. **Электромагнитные волны.** Волновые уравнения и их решения. Плоская электромагнитная волна, ее свойства и характеристики. Вектор Умова-Пойнтинга. Распространение электромагнитных волн в однородных изотропных средах и в неограниченной проводящей среде.

## ОПТИКА

23. **Интерференция света.** Когерентность колебаний. Интерференция волн. Способы получения интерференционной картины. Интерференция в тонких плёнках. Интерферометры.

24. **Дифракция света.** Принцип Гюйгенса-Френеля. Дифракция Френеля на простейших преградах. Дифракция Фраунгофера на одной щели. Дифракционная решётка. Дифракция света на многомерных структурах.

25. **Поляризация света.** Естественный и поляризованный свет. Поляризация излучения при отражении и преломлении на границе двух диэлектриков. Анизотропия оптических свойств кристаллов. Двухлучепреломление. Поляризационные приборы.

26. **Геометрическая оптика.** Основные законы геометрической оптики, пределы их применимости. Принцип Ферма. Линзы, зеркала, центрированные оптические системы. Кардинальные элементы идеальной оптической системы.

27. **Дисперсия света.** Нормальная и аномальная дисперсия. Фазовая и групповая скорости света. Спектральные приборы.

28. **Поглощение и рассеяние света.** Поглощение света. Рассеяние Рэлея и Ми. Комбинационное рассеяние.

29. **Лазер.** Спонтанное и вынужденное излучения. Люминесценция. Принцип работы лазера. Свойства лазерного излучения. Основные типы лазеров: твёрдотельные, жидкостные, газовые, полупроводниковые.

## **ФИЗИКА АТОМА И АТОМНЫХ ЯВЛЕНИЙ КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА**

30. **Корпускулярно-волновой дуализм.** Фотоэффект и эффект Комптона. Фотоны. Опыты по дифракции микрочастиц. Существование корпускулярных и волновых свойств у микрообъектов.

31. **Теория Бора и атом водорода.** Постулаты Бора и модель атома водорода согласно теории Бора. Опыты Франка и Герца. Стационарные состояния и уровни энергии атома водорода. Квантовые числа. Распределение электронной плотности.

32. **Волновая функция.** Вероятностная интерпретация волновой функции. Уравнение Шрёдингера для стационарных состояний.

33. **Момент импульса микрочастиц.** Орбитальный и спиновый моменты микрочастиц. Фермионы и бозоны. Принцип Паули.

34. **Строение многоэлектронных атомов.** Заполнение электронных слоев и оболочек атомов. Основные закономерности периодической системы элементов.

35. **Строение и свойства молекул.** Природа химической связи. Виды движения в молекуле. Электронные кривые, колебательные и вращательные состояния двухатомных молекул. Молекулярные спектры.

36. **Состояния и наблюдаемые в квантовой механике.** Влияние измерения на состояние физической системы как для чистых, так и для смешанных состояний. Статистическое распределение результатов измерения.

37. **Одновременная измеримость физических величин.** Совместные наблюдаемые. Понятие о полном наборе совместных наблюдаемых. Соотношение неопределенностей для физических величин.

38. **Принцип причинности в квантовой механике.** Изменение вектора состояния и наблюдаемых со временем. Время в квантовой механике. Квантовомеханические уравнения движения. Понятия о картинах изменения состояния (картины Шрёдингера, Гейзенберга и Дирака). Уравнение Шрёдингера для амплитуд вероятностей. Стационарные состояния и их свойства. Теорема Эренфеста.

39. **Интегралы движения в квантовой механике.** Квантовые переходы. Понятие об интеграле движения. Связь интегралов движения с симметрией системы: импульс и момент импульса как интегралы движения для замкнутой системы. Соотношение неопределенности для энергии. Вероятности переходов.

## **ФИЗИКА ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ**

40. **Статические свойства атомных ядер и ядерные модели.** Статические свойства атомных ядер. Удельная энергия связи ядра. Основные свойства ядерных сил и ядерные модели.

41. **Явление радиоактивности и альфа-распад.** Основной закон радиоактивного распада. Энергетические условия и механизм альфа-распада.

42. **Бета-распад.** Энергетические условия, спектр, нейтрино. Нарушение Р-четности при бета-распаде.

43. **Основные виды и механизмы протекания ядерных реакций.** Боровская модель ядерных реакций. Резонансные и нерезонансные реакции. Прямые ядерные реакции.

44. **Деление ядер.** Элементарная теория деления. Цепная ядерная реакция.

45. **Реакция синтеза.** Энергетические условия. Управляемый термоядерный синтез. Нуклеосинтез.

46. **Классификация элементарных частиц.** Фундаментальные частицы. Мезоны и барионы. Законы сохранения в мире элементарных частиц. Стабильные частицы, нестабильные частицы и резонансы.

47. **Фундаментальные взаимодействия.** Основные свойства фундаментальных взаимодействий. Элементы теорий объединения взаимодействий.

## **Раздел 2.**

## **ДИСЦИПЛИНЫ СПЕЦИАЛЬНОСТИ**

### **СПЕЦИАЛЬНОСТЬ:**

### **1-31 04 07 ФИЗИКА НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ**

#### **МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ НАНОСТРУКТУР И НАНОМАТЕРИАЛОВ**

1. **Методы эпитаксиального роста наноструктур.** Газофазная эпитаксия, жидкофазная эпитаксия. Молекулярно-лучевая эпитаксия. Модели эпитаксиального роста пленок Фольмера-Вебера, Франка-ван дер Мерве и Странски-Крастанова. Самоорганизация гетероэпитаксиальных структур. Методы молекулярного наслаивания и атомно-слоевой эпитаксии.

2. **Электронно- и ионно-лучевые методы нанолитографии.** Фоторезисты и их параметры. Рентгеновская литография. Электронная литография. Нелитографические методы формирования наноструктур. Процессы самоорганизации в нанотехнологиях.

3. **Формирование наноструктур зондовыми методами.** Локальное окисление металлов и полупроводников. Локальное химическое осаждение из газовой фазы. Локальное анодное окисление. Лазерное наноманипулирование.

4. **Методы получения углеродных наноматериалов.** Синтез углеродных нанотрубок методом электродугового распыления графита. Лазерная абляция графита. Химическое осаждение из газовой фазы. Формирование ориентированных массивов углеродных нанотрубок. Методы получения фуллеренов и графена.

#### **ИНЖЕНЕРНАЯ ГРАФИКА**

5. **Цветовые системы.** Система RGB. Система CMY. Система HSV. Система XYZ. Математическая морфология.

6. **Математические основы трехмерной машинной графики.** Аппаратные требования. Операции: сдвиг (перенос), симметрия, масштабирование, поворот. Алгоритмы.

7. **Распознавание полутоновых изображений чертежей.** Выделение границ. Сегментация полутоновых и многоканальных изображений. Распознавание прямых линий. Распознавание объектов прямоугольной формы.

8. **Аксонметрические проекции объектов.** Способ аксонметрического проецирования. Коэффициенты искажения. Изометрическая проекция. Диметрическая проекция. Аксонметрические проекции окружности, цилиндра, сферы.

### **ФИЗИКО-ХИМИЯ ПОВЕРХНОСТИ**

9. **Атомная структура поверхности.** Структура идеальной поверхности кристалла. Релаксированные и реконструированные поверхности. Дефекты структуры на атомарно-чистой поверхности.

10. **Колебания атомов вблизи поверхности.** Анализ колебательного спектра атомов на атомарно-чистой поверхности. Тепловое расширение поверхностных решеток.

11. **Электронная структура поверхности твердых тел.** Модель желе. Одномерная зонная теория.

12. **Основные характеристики области пространственного заряда (ОПЗ).** Заряд ОПЗ. Избыток свободных носителей заряда в ОПЗ.

### **ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРИНЦИПЫ НАНОТЕХНОЛОГИЙ**

13. **Баллистический транспорт электронов и дырок в конденсированных системах.** Уравнения баланса энергии и импульса. Токи, ограниченные объемным зарядом. Перенос электронов и дырок в наноразмерных структурах.

14. **Одноэлектронное туннелирование. Кулоновская блокада.** Эффект Ааронова–Бома. Приборы на основе эффектов туннелирования и квантовой интерференции

15. **Магнитное упорядочение в конденсированных системах.** Спектр энергии электронов и дырок кристалла в квантующем магнитном поле. Целочисленный и дробный квантовый эффект Холла. Эталон электрического сопротивления. Магнитные переключатели.

### **МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ НАНОСТРУКТУР И НАНОМАТЕРИАЛОВ**

16. **Методы магнитной спектроскопии.** ЭПР. Мессбауэровская спектроскопия.

17. **Электронно-зондовые методы диагностики.** Сканирующая туннельная микроскопия. Спектроскопия дальней тонкой структуры рентгеновского поглощения (EXAFS-спектроскопия).

18. **Ионно-зондовые методы диагностики.** Метод резерфордовского обратного рассеяния. Метод PIXE (Particle Induced X-ray Emission).

# ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

## РАЗДЕЛ 1

### СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИН СПЕЦИАЛИЗАЦИИ

#### 1-31 04 07 01 Нанопотоника

(специальность: 1-31 04 07 Физика наноматериалов и нанотехнологий)

1. **Электромагнитная природа световых волн.** Интерференция и дифракция световых волн. Энергетические характеристики электромагнитной волны. Когерентность световых волн.
2. **Атомная спектроскопия. Систематика спектров многоэлектронных атомов.** Квантовая модель излучения атома, спонтанные и вынужденные переходы. Ширина спектральной линии, однородное и неоднородное уширение. Систематика спектров многоэлектронных атомов, LS и jj-связь, мультиплетная структура терма, правила отбора.
3. **Колебательные спектры молекул.** Колебания двухатомных и многоатомных молекул. Характеристичность колебаний. Колебательно-вращательные спектры.
4. **Природа люминесценции и основные закономерности в спектрах люминесценции.** Люминесценция растворов сложных молекул. Перенос энергии электронного возбуждения. Спектры флуоресценции одиночных молекул.
5. **Поверхностные плазмоны и квантовые точки.** Закон дисперсии и методы возбуждения поверхностных плазмонов. Оптические и люминесцентные свойства квантовых точек.
6. **Оптические свойства фотонных кристаллов и фотонные устройства на их основе.** Зонная структура фотонных кристаллов. Фотонно-кристаллические среды и волноводы. Использование фотонных кристаллов как брэгговских зеркал. Микрорезонаторы.
7. **Полупроводниковые приемники и источники излучения.** Светодиоды и полупроводниковые инжекционные лазеры. Одноэлементные фотоприемники: p-i-n фотодиод, лавинный фотодиод. Многоэлементные фотоприемники: ПЗС-матрицы, КМОП-матрицы, фотоприемники ИК-диапазона.
8. **Принцип работы лазера и характеристики лазерного излучения. Типы лазеров.** Устройство и принцип работы лазера. Понятие активной среды и способы ее создания. Оптический резонатор и моды резонатора. Типы лазеров по виду активной среды и способу накачки активной среды.
9. **Динамические процессы в лазерах, генерация мощных импульсов.** Режимы свободной генерации, активной и пассивной модуляции добротности.
10. **Сверхкороткие световые импульсы.** Режимы активной и пассивной синхронизации мод. Фемтосекундные импульсы.
11. **Кинетическая спектроскопия.** Сверхбыстрые процессы. Пико- и фемтосекундная спектроскопия. Методы возбуждения и зондирования.
12. **Применения лазеров в науке, технике и медицине.** Лазеры в медицине и лазерная обработка материалов. Лазерная резка и лазерная сварка. Лазеры в хирургии, стоматологии и косметологии. Фотодинамическая лазерная терапия.
13. **Нелинейно-оптическая среда и типы нелинейности.** Понятие нелинейной среды и механизмы нелинейного изменения коэффициента поглощения и показателя преломления (керровская, резонансная, тепловая нелинейности).
14. **Нелинейно-оптические явления: самофокусировка, генерация второй гармоники, генерация волн на суммарной и разностной частоте.** Самовоздействие

светового пучка в нелинейной среде. Самофокусировка, автоколлимация и дефокусировка светового пучка. Генерация волн на суммарной и разностной частоте. Оптическое выпрямление. Генерация второй и более высоких гармоник.

15. **Когерентная оптика и запись тонких и объемных голограмм.** Временная и пространственная когерентность. Длина, время, площадь и объем когерентности. Дифракция на тонких и объемных голограммах. Угловая и спектральная селективность.

16. **Распространение света в оптических волноводах.** Распространение света в одномодовом и многомодовом оптическом волокне. Закономерности распространения света в системах связанных микроструктурированных волноводов. Понятие дискретной дифракции.

### **1-31 04 07 02 Нанoeлектроника**

**(специальность: 1-31 04 07 Физика наноматериалов и нанотехнологий)**

1. **Уравнение Шредингера для кристалла.** Адиабатическое и одноэлектронное приближения.

2. **Теория квазисвободного и квазисвязанного электрона в кристалле.** Модель Кронига–Пенни.

3. **Трансляционная симметрия поля решетки.** Квазиимпульс электрона проводимости; приближение эффективной массы. Обратная решетка. Зоны Бриллюэна.

4. **Плотность состояний носителей заряда.** Делокализованные электроны и электронные вакансии (дырки) в кристаллическом полупроводнике. Эффективная масса плотности состояний.

5. **Уровень Ферми электронов.** Концентрация делокализованных электронов и дырок в собственном и легированном полупроводниках.

6. **Колебания кристаллической решетки.** Акустические и оптические фононы. Статистика фононов. Теплоемкость решетки.

7. **Зонная электропроводность кристаллических полупроводников на постоянном токе.** Рассеяние носителей заряда. Подвижность электронов и дырок.

8. **Гальваномагнитные эффекты.** Магниторезистивный эффект. Классический эффект Холла. Квантовый эффект Холла.

9. **Неравновесные электроны и дырки в полупроводниках.** Квазиуровни Ферми для электронов и дырок. Фотопроводимость. Полупроводниковые приемники электромагнитного излучения.

10. **Рекомбинация неравновесных носителей заряда.** Излучательная и ударная рекомбинации. Полупроводниковые источники излучения. Рекомбинация на локальных центрах.

11. **Конденсированные системы различной размерности.** 0D- (атомный кластер), 1D- (нить), 2D- (пленка), 3D- (монокристалл). Одноэлектронная плотность состояний в квантовых точках, нитях, ямах.

12. **Перенос заряда в низкоразмерных системах.** Баллистический транспорт электронов и дырок. Туннелирование в системах пониженной размерности.

13. **Барьерные структуры.** Контакт металл–полупроводник.  $pn$ -Переход в равновесии и при электрическом смещении.

14. **Биполярные транзисторы.** Принцип действия, схемы включения. Методы формирования транзисторных структур.

15. **Полевые транзисторы.** Принцип действия, схемы включения. Методы формирования транзисторных структур.

16. **Основные технологические этапы изготовления микросхем.** Формирование диэлектрических и проводящих пленок. Фотолитография. Травление. Диффузионное легирование. Ионная имплантация. Корпусирование.

17. **Операционные усилители.** Основные правила и схемы включения. Напряжение смещения. Компараторы.

18. **ЭСЛ-, TTL-, КМОП-логики.** Режимы работы, схемная реализация. Нагрузочная способность.
19. **Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи.** Типы АЦП. Скоростные АЦП. Принципы работы. Схемные решения.
20. **Микроконтроллеры.** Особенности применения. Структурная схема. Система команд. Методы программирования. RISC и PIC контроллеры.

**1-31 04 07 05 Нанобиоматериалы и нанобиотехнологии**  
(специальность: 1-31 04 07 Физика наноматериалов и нанотехнологий)

1. **Диффузия веществ в биосистемах.** Диффузия веществ в растворе. Коэффициент диффузии. Эквивалентная диффузионная сила. Диффузия веществ через мембраны. Коэффициент проницаемости.
2. **Электродиффузия в биосистемах.** Электродиффузия ионов в растворе. Уравнение Нернста-Планка. Транспорт ионов через мембраны. Мембранный потенциал. Уравнение Гольдмана.
3. **Биофизика нервного импульса.** Потенциал покоя и потенциал действия. Генерация и распространение потенциала действия. Модель Ходжкина-Хаксли. Кабельное уравнение.
4. **Кинетика ферментативных процессов.** Скорость ферментативной реакции. Уравнение Михаэлиса-Ментен. Ингибирование ферментативной реакции. Субстратное и продуктное угнетение реакции.
5. **Перенос электронов в биосистемах.** Перенос электронов с участием белков. Теория Маркуса. Туннелирование электронов в белках. Факторы, влияющие на скорость переноса электронов в белках.
6. **Трансформация энергии в биомембранах.** Теория Митчелла. Макромолекулярные преобразователи энергии в биосистемах. Электрон-транспортная цепь. Физические основы функционирования протонной АТФ-синтазы.
7. **Биофизика рецепции информации в клетках.** Молекулярное узнавание и термодинамика взаимодействия биомолекулярных структур. Лиганд-рецепторное взаимодействие. Константа связывания и диссоциации.
8. **Модели сворачивания полимеров.** Конформации полимера. Свободно-сочлененная модель сворачивания полимера в клубок. Средний косинус вращения и формула Ока. Поворотной-изомерная модель. Скручивание жестких полимеров.
9. **Структура и физические свойства нуклеиновых кислот.** Первичная и различные типы вторичных структур нуклеиновых кислот. Основные физические свойства молекул нуклеиновых кислот и их растворов.
10. **Структура и физические свойства белков.** Иерархия пространственной структуры белка. Взаимодействия, определяющие формирование вторичной, третичной, четвертичной структуры белка. Основные физические свойства белков.
11. **Люминесценция.** Виды люминесценции. Диаграмма переходов при фотолюминесценции и основные закономерности формирования спектров. Связь поляризации люминесценции с микровязкостью среды.
12. **Электронная спектроскопия биомолекул.** Положение спектров поглощения при различных видах электронных переходов. Характеристики спектров поглощения аминокислот, белков, нуклеотидов и ДНК. Спектрофотометрический анализ структуры ДНК и белков.
13. **Действие ионизирующей радиации на биомакромолекулы и клетки.** Стадии развития радиационно-биохимических процессов. Прямое и косвенное действие ионизирующих излучений. Радиационно-химические повреждения аминокислот, белков, липидов и нуклеиновых кислот. Реакция клеток на облучение.

14. **Температурный и кислородный эффекты при действии ионизирующих излучений.** Стадии развития радиационно-биохимических процессов. Прямое и косвенное действие ионизирующих излучений. Теория кислородного эффекта при действии ионизирующих излучений. Температурный эффект при действии ионизирующих излучений.

15. **Принцип попадания и концепция мишени.** Основные положения теории попадания. Концепция мишени. Одно- и многоударные процессы. Кривые «доза-эффект» для одноударных и многоударных процессов. Влияние репарационных процессов на форму кривых «доза-эффект».

16. **Основные положения стохастической теории действия ионизирующей радиации на клетки.** Ограничения теории попадания. Стохастическая теория действия ионизирующих излучений на биологические объекты. Теорема об относительной крутизне кривой «доза-эффект».

17. **Диссипативные структуры.** Условия возникновения диссипативных структур. Модель брюсселятора. Особенности морфогенеза.

## РАЗДЕЛ 2

### ПРИМЕРЫ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАНИЙ

#### 1-31 04 07 01 Нанопотоника

(специальность: 1-31 04 07 Физика наноматериалов и нанотехнологий)

**Задание 1.** Необходимо провести измерение нелинейного поглощения в зависимости от длительности лазерного импульса в диапазоне от 10 до 100 нс. Предложите метод плавного изменения длительности лазерного импульса.

#### *Решение*

Импульсы с длительностью 10 – 100 нс генерируются в лазерах с модуляцией добротности. При использовании метода активной модуляции добротности длительность импульса зависит от превышения мощности накачки порогового значения. При большой мощности накачки эта длительность стремится к времени жизни фотона в резонаторе, определяемого формулой:

$$\tau_{\Phi} = 1/cK_{\text{пот}},$$

где  $c$  – скорость света,  $K_{\text{пот}}$  – коэффициент потерь.

В лазерах с модуляцией добротности одно из зеркал имеет, как правило, низкий коэффициент отражения. Поэтому коэффициент потерь будет определяться, так называемыми, полезными потерями, определяемыми формулой:

$$K_{\text{пот}} = \frac{1}{2L} \cdot \ln \frac{1}{R_1 \times R_2},$$

где  $L$  – база резонатора,  $R_1, R_2$  – коэффициенты отражения зеркал резонатора.

Если мы выберем базу резонатора  $L=100$  см и коэффициенты отражения зеркал  $R_1=100\%$  и  $R_2=20\%$ , то получаем коэффициент потерь  $K_{\text{пот}}=0,008$  см<sup>-1</sup>. Тогда время жизни фотона в резонаторе  $\tau_{\Phi}=4$  нс. Это предельное время, которое достигается при мощности накачки, стремящейся к бесконечности. Если выбрать мощность накачки в несколько раз, превышающей пороговое значение, то можно получить импульсы с длительностью в несколько времен жизни  $\tau_{\Phi}$ . При приближении к пороговому значению



накачки длительность плавно изменяется и может достигать несколько десятков времен жизни фотона в резонаторе.

**Задание 2.** Рассчитать геометрию схемы записи объемной пропускающей фазовой голограммы на фотоэмульсии толщиной слоя  $d=10$  мкм Nd:YAG лазером с диодной накачкой, работающем в режиме генерации второй гармоники на длине волны  $\lambda=532$  нм. Показатель преломления фоточувствительной среды  $n=1,5$ .

*Решение*

Принадлежность голограммы к объемной дифракционной структуре определяется из параметра Клейна  $Q$  исходя из условия:

$$Q = \frac{2\pi\lambda d}{n \Lambda^2} > 10,$$

где  $\lambda$ - длина волны лазерного излучения,  $d$ -толщина фоточувствительного слоя,  $n$ - показатель преломления фотоэмульсии,  $\Lambda$  -период интерференционной структуры.

Значение параметра Клейна  $Q = 10$  определяет максимальный период  $\Lambda$  интерференционной картины, обеспечивающий запись объемной голограммы в слое фотоэмульсии.

Из условия  $\frac{2\pi\lambda d}{n \Lambda^2} = 10$  находим наибольшее предельное значение

периода интерференционной картины:  $\Lambda^2 = \frac{2\pi \cdot 0,5 \cdot 10}{1,5 \cdot 10} \approx 2 \text{ мкм}, \quad \Lambda = 1,4 \text{ мкм},$

соответствующее формированию объемной дифракционной структуры.

Подставляя полученное значение периода  $\Lambda$  в формулу, связывающую угол  $\varphi$  между опорным и предметным пучками, записывающими голографическое изображение и длину волны излучения с периодом интерференционной картины  $\Lambda$ , получаем значение

половинного угла между пучками :  $\Lambda = \frac{\lambda}{2 \sin \frac{\varphi}{2}} \Rightarrow \frac{\varphi}{2} = \frac{\lambda}{2\Lambda} = \frac{0,5}{2 \cdot 1,4} = 0,17 \approx 9,6^\circ.$

Следовательно, минимальный угол между предметным и опорным пучками  $\varphi$ , обеспечивающий запись объемной пропускающей фазовой голограммы при заданных в задаче условиях записи голограммы составляет  $\varphi \approx 20^\circ$ .

**1-31 04 07 02 Нанoeлектроника**

**(специальность: 1-31 04 07 Физика наноматериалов и нанотехнологий)**

**Задание 1.** Для планирования эксперимента Вам необходимо оценить внешнее воздействие излучения на кремниевую пластину. Пластина легирована фосфором с концентрацией  $10^{15} \text{ см}^{-3}$ . В ходе эксперимента ожидается ее облучение инфракрасным светом инфракрасного диапазона, причем  $1/\alpha \gg d$ , где  $\alpha$  — коэффициент поглощения;  $d$  — толщина пластины. Найдите

1. Результирующую концентрацию основных и неосновных носителей заряда если в стационарных условиях генерируется  $\Delta n = \Delta p = 10^{12} \text{ см}^{-3}$ .

2. Положение квазиуровней электронов и дырок Ферми относительно уровня Ферми в собственном полупроводнике (относительно уровня Ферми в неосвещенном полупроводнике).

*Решение*

$$n = 10^{15} + 10^{12} \approx 10^{15} \text{ см}^{-3}$$

$$p = 2,1 \cdot 10^5 + 10^{12} \approx 10^{12} \text{ см}^{-3}$$

$$E_{Fn} - E_i = kT \ln(n/n_i) = 0,29 \text{ эВ}$$

$$E_i - E_{Fp} = kT \ln(p/n_i) = 0,11 \text{ эВ}$$

$$E_{Fn} - E_F = kT \ln(1 + \Delta n/n_0) \approx 0$$

$$E_F - E_{Fp} = kT \ln(1 + \Delta p/p_0) \approx 0,026 \cdot \ln(0,48 \cdot 10^7) \approx 0,4 \text{ эВ}$$

**Задание 2.** Для планирования опытно-технологических работ по созданию выпрямительного диода с  $pn$ -переходом необходимо иметь предварительные данные о типовом технологическом маршруте. Предложите предварительную схему маршрута создания дискретного диода с  $pn$ -переходом.

*Возможное решение*

Простейшая структура диода предполагает формирование области  $p$ - $n$ -перехода, сильнолегированной области для обеспечения омического контакта к тыльной стороне, нанесение металлических контактов, нанесение покрытий и корпусирование для защиты диода от внешних воздействий. Соответственно, планируемые технологические операции должны обеспечивать решение данных задач.

- 1 Формирование партии пластин, химобработка (отмывка)
- 2 Пирогенное окисление
- 3 Нанесение и сушка фоторезиста
- 4 Травление окисла до кремния
- 5 Плазмохимическое снятие фоторезиста, химобработка (отмывка)
- 6 Диффузия фосфора для создания омического контакта к тыльной стороне
- 7 Химобработка, нанесение и сушка фоторезиста
- 8 1-я фотолитография «Анод»**
- 9 Проявление, задубливание фоторезиста
- 10 Плазмохимическое снятие фоторезиста
- 11 Травление окисла
- 12 Снятие фоторезиста, химобработка (отмывка)
- 13 Пирогенное окисление (защитное)
- 14 Ионное легирование бором
- 15 Плазмохимическая обработка, химобработка (отмывка)
- 16 Пирогенное окисление (анод)
- 17 Травление окисла до кремния, химобработка (отмывка)
- 18 Отжиг
- 19 Нарращивание среднетемпературного фосфоросиликатного стекла
- 20 Нанесение и сушка фоторезиста
- 21 2-я фотолитография «Контакты»**
- 22 Проявление, задубливание фоторезиста
- 23 Плазмохимическое снятие фоторезиста
- 24 Травление СТФСС
- 25 Снятие фоторезиста, химобработка (отмывка)
- 26 Напыление алюминия на планарную сторону
- 27 Нанесение и сушка фоторезиста
- 28 3-я фотолитография «Металлизация»**
- 29 Проявление, задубливание фоторезиста
- 30 Плазмохимическое снятие фоторезиста
- 31 Травление металлизации
- 32 Снятие фоторезиста, химобработка (отмывка)

- 33 Напыление алюминия на тыльную сторону
- 34 Вжигание металлизации
- 35 Корпусирование

**1-31 04 07 05 Нанобиоматериалы и нанобиотехнологии**  
**(специальность: 1-31 04 07 Физика наноматериалов и нанотехнологий)**

**Задание 1.** В жидкостях вследствие теплового движения молекулы испытывают многочисленные столкновения. Рассматривая движение белка в цитозоле как следствие молекулярных столкновений, определите время перемещения белка в клетке при случайном движении на расстояние, равное диаметру клетки (10 мкм), если коэффициент диффузии белка равен  $6 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}$ .

*Возможное решение*

Для анализа случайных блужданий можно рассмотреть одномерный случай, а затем суммировать компоненты по всем направлениям.

Пусть в произвольной плоскости пространства ( $x=x_0$ ) находится группа частиц, которые в момент времени ( $t=0$ ) начинают перемещаться. Предположим, что частицы могут двигаться (совершать скачки) только по нормали к исходной плоскости, т. е. вдоль оси  $x$ , как налево, так и направо, и что длина каждого скачка одна и та же и равна  $\delta$ . Движение частиц осуществляется случайным образом. Это значит, что вероятность того, что частица совершит очередной скачок влево или вправо одинакова (равна 1/2) и не зависит ни от того, каким был ее предыдущий скачок, ни от других частиц. Для простоты будем считать, что каждый очередной скачок частица делает через равные промежутки времени  $\tau$  («время оседлой жизни»), и, следовательно, за время  $t$  она сделает  $n = t/\tau$  скачков. Таким образом, при случайном блуждании вдоль оси  $x$  смещения частицы после  $n$ -го и  $(n + 1)$ -го скачков связаны соотношением

$$x_{n+1} = x_n \pm \delta. \quad (1)$$

Область пространства, в которой побывает молекула, со временем увеличивается и может быть идентифицирована как корень квадратный от среднеквадратичного перемещения

$$\langle r^2 \rangle^{1/2}.$$

Для одномерного случая этой величиной будет  $\langle x_n^2 \rangle^{1/2}$ . Возведем обе части равенства (1) в квадрат:

$$x_{n+1}^2 = x_n^2 + \delta^2 \pm 2x_n \delta. \quad (2)$$

Усредним этот результат по всем частицам:

$$\langle x_{n+1}^2 \rangle = \langle x_n^2 \rangle + \delta^2. \quad (3)$$

Равенство (3) справедливо для любого  $n$ , значит,

$$\langle x_1^2 \rangle = \delta^2; \langle x_2^2 \rangle = \langle x_1^2 \rangle + \delta^2 = 2\delta^2; \langle x_3^2 \rangle = \langle x_2^2 \rangle + \delta^2 = 3\delta^2 \text{ и т. д.}$$

Таким образом,

$$\langle x_n^2 \rangle = n\delta^2 \quad (4)$$

и

$$\langle x_n^2 \rangle^{1/2} = n^{1/2} \delta = \delta\sqrt{n}. \quad (5)$$

Учитывая, что за время  $t$  молекула совершит  $n$  перемещений ( $n = \frac{t}{\tau}$ ), имеем

$$\langle x^2 \rangle = n \delta^2 = \delta^2 \frac{t}{\tau}. \quad (6)$$

Коэффициент диффузии молекул, совершающих случайные блуждания, связан с длиной скачка и временем оседлой жизни молекулы соотношением

$$D = \frac{\delta^2}{2\tau} \quad (7)$$

Получаем

$$\langle x^2 \rangle = 2Dt. \quad (8)$$

Для случайного блуждания белка в трехмерном случае выполняется соотношение

$$\langle r^2 \rangle = \langle x^2 \rangle + \langle y^2 \rangle + \langle z^2 \rangle. \quad (9)$$

Так как движение произвольно, то исследование случайных блужданий в двух других направлениях ( $y$  и  $z$ ) приводит к выражениям, совпадающим с (8), т.е.  $\langle x^2 \rangle = \langle y^2 \rangle = \langle z^2 \rangle = 2Dt$ .

Следовательно,

$$\langle r^2 \rangle = 6Dt. \quad (10)$$

Тогда время перемещения белка на расстояние 10 мкм будет

$$t = \frac{\langle r^2 \rangle}{6D} \\ t = (10^{-5} \text{ м})^2 / 6 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с} = 16,6 \text{ с}$$

**Задание 2.** Стимуляция пролиферации и дифференцировки эритроидных клеток-предшественников наблюдается при связывании эритропоэтина со 100 рецепторами на поверхности клетки. Во сколько раз необходимо увеличить концентрацию лиганда для достижения клеточного ответа, если число рецепторов на поверхности клетки уменьшится с 1000 до 125? Константа диссоциации для связывания эритропоэтина к его рецептору составляет  $10^{-10}$  М.

#### *Возможное решение*

При образовании лиганд-рецепторного комплекса ( $LR$ ) связывание лиганда ( $L$ ) с рецептором ( $R$ ) обратимо и описывается уравнением (1):



В состоянии равновесия, согласно закону действующих масс:

$$k_{+1}[L]([R_0] - [LR]) = k_{-1}[LR], \quad (2)$$

где  $k_{+1}$  и  $k_{-1}$  – константы скоростей ассоциации и диссоциации лиганд-рецепторного комплекса,  $R_0$  – общее число рецепторов,  $[L]$  – концентрация лиганда,  $[LR]$  – концентрация лиганд-рецепторного комплекса.

Константа диссоциации характеризует соотношение между занятыми и свободными от лиганда рецепторами в условиях равновесия:

$$k_o = \frac{k_{-1}}{k_{+1}} = \frac{[L]([R_0] - [LR])}{[LR]}. \quad (3)$$

Отсюда видно, что концентрация лиганд-рецепторного комплекса будет равна

$$[LR]k_o = [L]([R_o] - [LR]), \quad (4)$$

или

$$\frac{[LR]}{[R_o]}k_o = [L]\left(1 - \frac{[LR]}{[R_o]}\right). \quad (5)$$

Разделив обе части уравнения (5) на  $\frac{[LR]}{[R_o]}$ , получаем

$$\frac{[R_o]}{[LR]}[L] = [L] + k_o \quad (6)$$

или

$$\frac{[LR]}{[R_o]} = \frac{[L]}{k_o + [L]}. \quad (7)$$

Концентрацию лиганда, необходимую для активации клеток, можно определить из уравнения (7), то есть

$$[L] = \frac{k_o}{\frac{[R_o]}{[LR]} - 1}.$$

Если число рецепторов составляет 1000, то для активации клетки необходим эритропоэтин в концентрации  $1,1 \times 10^{-11}$  М. При уменьшении числа рецепторов в 8 раз (125 рецепторов на 1 клетку), для достижения максимального клеточного ответа необходимо увеличить концентрацию лиганда в 36 раз (до концентрации  $4 \times 10^{-10}$  М).

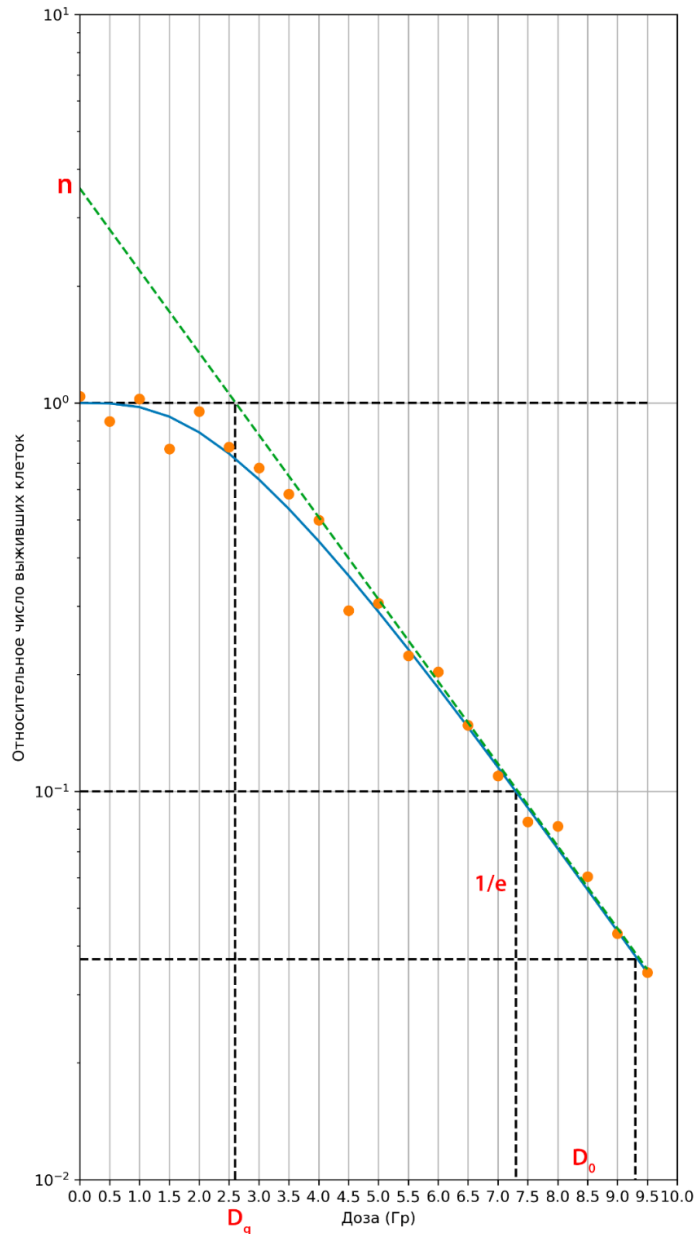
**Задание 3.** В эксперименте по инактивации клеток под действием гамма-излучением была получена зависимость доза-эффект, соответствующая многоударной-одномишенной модели. На линейном участке кривой доза-эффект выживаемость облученных клеток составила 0,1 и 0,037 при дозах 7,3 и 9,3 Гр, соответственно. Определите среднюю инактивирующую дозу, квазипороговую дозу и среднее число попаданий в мишень и сделайте вывод о радиочувствительности исследуемых клеток.

#### *Возможное решение*

В случае многоударного-одномишенного процесса зависимость доза-эффект в полулогарифмическом масштабе представляет собой кривую с плечом, имеющую линейный участок при больших дозах (см. рис.).

Параметры, характеризующие радиочувствительность клеток:

- $D_0$  – средняя инактивирующая доза (доза, при которой число жизнеспособных клеток уменьшается в  $e$  раз в области доз, соответствующих прямолинейному участку кривой доза-эффект);
- $n$  – экстраполяционное число (соответствует числу попаданий, необходимых для инактивации мишени). Экстраполяционное число равно отрезку, отсекаемому на оси ординат при экстраполяции линейного участка кривой доза-эффект к нулевой дозе.
- $D_q$  – квазипороговая доза (позволяет оценить интенсивность репарационных процессов в облученных клетках). Квазипороговая доза соответствует отрезку, отсекаемому от перпендикуляра, проведенного из точки 100-процентной выживаемости на оси ординат, продолжением линейного участка кривой доза-эффект.



Из условия задачи следует, что увеличение дозы облучения с 7,3 до 9,3 Гр соответствует снижению выживаемости клеток в  $\frac{0,037}{0,1} = 0,37 \approx \frac{1}{e}$  раз. Тогда средняя инактивирующая доза  $D_0 = 9,3 - 7,3 = 2,0$  Гр.

Так как кривая доза-эффект для многоударного процесса с одной мишенью имеет прямолинейный участок в полулогарифмическом масштабе, то уравнение прямой, соответствующей прямолинейному участку кривой доза-эффект имеет вид:

$$y = be^{aD}, \quad (1)$$

Прологарифмировав уравнение (1) получим следующее уравнение:

$$\ln y = aD + \ln b \quad (2)$$

Подставляя значения из условия в уравнение (2), получаем следующую систему линейных уравнений:

$$\begin{cases} \ln 0,1 = 7,3 \cdot a + \ln b \\ \ln 0,037 = 9,3 \cdot a + \ln b \end{cases} \quad (3)$$

Решая систему уравнений (3), получаем значения  $a$  и  $\ln b$  равные 0,5 и 1,35, соответственно. При нулевой дозе прямая, описываемая уравнением (2), отсекает на оси ординат отрезок, длина которого равна  $\ln b$ . Таким образом, экстраполяционное число  $n = e^b = e^{1,35} \approx 3,9$ .

Величину квазипороговой дозы  $D_q$  можно получить из уравнения (2), подставив в него значение выживаемости  $y = 1$ . Тогда получаем:

$$\begin{aligned} \ln 1 = 0 &= -0,5D_q + 1,35, \\ D_q &= 2,7(\text{Гр}) \end{aligned} \quad (4)$$

Таким образом, получены следующие значения параметров кривой доза-эффект: средняя инактивирующая доза  $D_0 = 2$  Гр, квазипороговая доза  $D_q = 2,7$  Гр, экстраполяционное число  $n = 3,9$ .

Исходя из полученных значений параметров  $D_q$ ,  $D_0$  и  $n$ , можно сделать вывод, что исследуемые клетки являются животными клетками с высокой пролиферативной активностью (для которых квазипороговая доза обычно не превышает 3 – 5 Гр) и характеризуются высокой радиочувствительностью, о чем свидетельствует достаточно низкое значение средней инактивирующей дозы, а также небольшое экстраполяционное число.

## ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### Перечень основной литературы

#### Общая физика

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. В 5 т. Т. 1. Механика. / Сивухин Д.В.— М.: Физматлит; Изд-во МФТИ. 2005.— 560 с.
2. Матвеев А.Н. Механика и теория относительности. / Матвеев А.Н. —СПб.: Лань. 2009.— 366 с.
3. Матвеев А.Н. Молекулярная физика. / Матвеев А.Н.— СПб.: Лань. 2010.— 368 с.
4. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм. / Матвеев А.Н.— СПб.: Лань. 2010.— 464 с.
5. Ландсберг Г.С. Оптика. / Ландсберг Г.С.— М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.— 848 с.
6. Калашников С.Г. Электричество. / Калашников С.Г.— М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.— 624 с.,
7. Бутиков Е.И. Оптика : учебное пособие для вузов / Бутиков Е.И.— СПб.: Лань. 2012.— 608 с
8. Шпольский А.В. Атомная физика Том 1 и 2. / Шпольский А.В.— М.: Наука, 1974.— 581 с.
9. Мухин К.Н. Экспериментальная ядерная физика. / Мухин К.Н.— СПб.: Лань. 2016.— 383 с.
10. Широков Ю.М. Юдин Н.П. Ядерная физика . / Широков Ю.М. Юдин Н.П.— М.: Наука, 1980.— 728 с.
11. Окунь Л.Б. Физика элементарных частиц. / Окунь Л.Б. .— М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988.— 272 с.
12. Вихман Э. Квантовая физика. / Вихман Э. .— М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит.,1986.— 392 с.
13. Саржевский А.М. Оптика / Саржевский А.М.— М.: УРСС, 2018.— 608 с.

#### Теоретическая механика

1. Ландау, Л.Д. Механика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц.— М.: Физматлит, изд. 7-е, 2015.— 224 с.
2. Ольховский, И.И. Курс теоретической механики для физиков / И.И. Ольховский.— СПб.: Лань, изд. 4-е, 2009.
3. Ландау, Л.Д. Гидродинамика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц.— М.: Физматлит, изд. 6-е, 2015.— 728 с.

#### Электродинамика

1. Ландау, Л.Д. Теория поля / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц.— М.: Физматлит, изд. 9-е, 2016.— 508 с
2. Ландау, Л.Д. Электродинамика сплошных сред / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц.— М.: Физматлит, изд. 4-е, 2016.— 656 с.
3. Тамм, И.Е. Основы теории электричества / И.Е. Тамм.— М.: Физматлит, изд. 11-е, 2003.— 616 с.
4. Джексон Дж. Классическая электродинамика / Дж. Джексон.— М.: Мир, 1965.— 703 с.

#### Квантовая механика

1. Давыдов, А.С. Квантовая механика / А.С. Давыдов.— СПб.: БХВ-Петербург, изд. 3-е, 2011.— 704 с.
2. Ландау, Л.Д. Квантовая механика (нерелятивистская теория) / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц.— М.: Физматлит, изд. 6-е, 2016.— 800 с
3. Мессиа, А. Квантовая механика. В 2 т. / А. Мессиа.— М.: Наука, 1978.



### **Термодинамика и статистическая физика**

1. Базаров, И.П. Термодинамика / И.П. Базаров.— СПб.: Лань, изд. 5-е, 2010.— 384 с.
2. Ландау, Л.Д. Статистическая физика. Ч.1 / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц.— М.: Физматлит, изд. 6-е, 2013.— 616 с
3. Леонтович, М.А. Введение в термодинамику / М.А. Леонтович.— СПб.: Лань, изд. 2-е, 2008.— 432 с.

### **СПЕЦИАЛЬНОСТЬ:**

#### **1-31 04 07 ФИЗИКА НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ**

##### **Методы создания наноструктур и наноматериалов**

1. Пул Ч., Оуэнс Ф. Нанотехнологии. -М.: Техносфера, 2004. -328 с.
2. Наноматериалы и нанотехнологии./ Под ред. В.Е.Борисенко. –Минск: «Издательский центр БГУ», 2008. -374 с.
3. Нанотехнологии в электронике/ Под. ред Ю.А.Чаплыгина. -М.: Техносфера, 2005. -348 с.
4. Щука А.А. Наноэлектроника. –М.: Физматкнига, 2007, - 464 с.

##### **Инженерная графика**

1. Абламейко, С.В. Обработка изображений: технологии, методы, применение / С.В. Абламейко, Д.М. Лагуновский. – Минск: Амалфея, 2000. – С. 94-105.
2. Автоматизация проектирования радиоэлектронных средств: Учеб. пособие для вузов /О.В Алексеев [и др.]; под общ. ред. О.В. Алексеева. – М.: Высшая школа, 2000.
3. Абламейко, С.В. Обработка изображений: технологии, методы, применение /С.В. Абламейко, Д.М. Лагуновский. – Минск: Амалфея, 2000. Гл. 6.4; гл. 7.
4. Чекмарев, А.А. Инженерная графика /А.А. Чекмарев. – М.: Высшая школа, 2000. Гл. 11

##### **Физико-химия поверхности**

1. Киселев В.Ф., Козлов С.Н., Зотеев А.В. Основы физики поверхности твердого тела. М.: Изд-во МГУ. 1999. – 284 с.

##### **Фундаментальные принципы нанотехнологий**

1. Андронов, А.А. Теория колебаний / А.А. Андронов, А.А. Витт, С.Э. Хайкин. – М.: Наука,
2. Андо, Т. Электронные свойства двумерных систем / Т. Андо, А. Фаулер, Ф. Стерн.– М.: Мир, 1985.– 416 с.
3. Имри, Й. Мезоскопическая физика / Й. Имри.– М.: Физматлит, 2002.– 304 с.
4. Квантовый эффект Холла / под ред. Р. Пренджа, С. Гирвина.– М.: Мир, 1989.– 408 с.
5. Драгунов, В.П. Основы наноэлектроники / В.П. Драгунов, И.Г. Неизвестный, В.А. Гридчин.– Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000.– 332 с.

##### **Методы диагностики наноструктур и наноматериалов**

1. Оджаев, В.Б. Современные методы исследования конденсированных материалов / В.Б. Оджаев, Д.В. Свиридов, И.А. Карпович, В.В. Понарядов – Мн.: БГУ, 2003. – 82 с.
2. Холмецкий, А.А. Мёсбауэрские концентратомеры / А.А. Холмецкий, О.В. Мисевич – Мн.: Университетское, 1992.- 96 с.

##### **Специализация 1-31 04 07 01 Нанофотоника**

###### **(специальность: 1-31 04 07 Физика наноматериалов и нанотехнологий)**

1. М.А. Ельяшевич. Атомная и молекулярная спектроскопия. М.: Эдиториал УРСС, 2001.

2. А.И. Комяк Молекулярная спектроскопия. Мн.: БГУ, 2005.
3. И.М. Гулис, А.И. Комяк. Люминесценция. Мн.: БГУ, 2009.
4. И.М. Гулис. Лазерная спектроскопия. Курс лекций. Минск: БГУ, 2002.
5. Гапоненко С.В., Розанов Н.Н., Ивченко Е.Л., Федоров А.В., Бонч-Бруевич А.М., Вартанян Т.А., Пржибельский С.Г. Оптика наноструктур. СПб.: Недра. 2005.
6. С.В.Гапоненко. Введение в нанофотонику. – Кембридж, изд-во Кембриджского университета, 2010.
7. Игнатов А.Н. Оптоэлектроника и нанофотоника. С.-Пб.: Лань. 2011.
8. Новотный Л., Хехт Б. Основы нанооптики. М.: Физматлит. 2011.
9. Л.Н. Курбатов. Оптоэлектроника видимого и инфракрасного диапазонов спектра // М.: Изд-во МФТИ, 2001.
10. О. Звелто. Принципы лазеров. М.: Мир, 1984.
11. А.Л.Толстик, И.Н.Агишев, Е.А.Мельникова. Лазерная физика. Лабораторный практикум. – Мн.: БГУ, 2006.
12. Дж. Реди. Промышленное применение лазеров. М.: Мир, 1981.
13. В.В. Тучин. Лазеры и волоконная оптика в биомедицинских исследованиях. Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1998.- 384 с.
14. С.Н.Курилкина, А.А.Минько. Нелинейная оптика. Мн.: БГУ. 2010
15. Л.С.Гайда, А.Л.Толстик, В.В.Могильный, Е.А.Мельникова, Д.В.Гузатов, А.Ч.Свистун. Лабораторный практикум по когерентной оптике и голографии. Гродно: ГрГУ. 2013.
16. И.Н.Агишев, И.А.Гончаренко, Д.В.Горбач, Е.А.Мельникова, О.Г.Романов, А.Л.Толстик. Волоконная оптика и оптическая обработка информации. Лабораторный практикум // Минск, БГУ, 2011.

### **Специализация 1-31 04 07 02 Нанoeлектроника**

#### **(специальность: 1-31 04 07 Физика наноматериалов и нанотехнологий)**

1. Шалимова К.В. Физика полупроводников.— С-Пб.: «Лань», 2010 г. — 384с.
2. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников.— С-Пб.: «Лань», 2016 г. — 624с.
3. Хоровиц Н., Хил Н. Искусство схемотехники.— М.: Издательство «Бином», 2015 - 697 с.
4. Смирнов Ю.А., Соколов С.В., Титов Е.В. Физические основы электроники.— С-Пб.: «Лань», 2013 г. — 560с.
5. Игнатов А.Н. Оптоэлектроника и нанофотоника. — С-Пб.: «Лань», 2017 г. — 596с.
6. Сорокин В.С., Антипов Б.Л., Лазарева Н.П. Материалы и элементы электронной техники. Проводники, полупроводники, диэлектрики. .— С-Пб.: «Лань», 2015 г. — 448с.
7. Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы.– СПб.: Издательство «Лань», 2009.– 480 с.
8. Александров С.Е., Греков Ф.Ф. Технология полупроводниковых материалов.— С-Пб.: «Лань», 2012 г. — 240с.
9. Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники. – СПб.: Издательство «Лань», 2003. – 368 с.
10. Щука, А.А. Нанoeлектроника / А.А. Щука. – М.: Физматкнига, 2007. – 464 с.
11. Бонч-Бруевич, В.Л. Физика полупроводников / В.Л. Бонч-Бруевич, С.Г. Калашников — М.: Наука, 1990.— 688 с.
12. Марголин В.И., Жабрев В.А., Лукьянов Г.Н., Тупик В.А. Введение в нанотехнологии. — С-Пб.: «Лань», 2012 г. — 464с.
13. Поклонский, Н.А. Статистическая физика полупроводников / Н.А. Поклонский, С.А. Вырко, С.Л. Поденок.— М.: КомКнига, 2005.— 264 с.

14. Кобаяси, Н. Введение в нанотехнологию / Н. Кобаяси. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2005. – 134 с.
15. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2001.– 488 с

**Специализация 1-31 04 07 05 Нанобиоматериалы и нанобиотехнологии  
(специальность: 1-31 04 07 Физика наноматериалов и нанотехнологий)**

1. Мартинович Г.Г., Сазанов Л.А., Черенкевич С.Н. Клеточная биоэнергетика: физико-химические и молекулярные основы. М: URSS: ЛЕНАНД, 2017. 196 с.
2. Черенкевич С.Н., Мартинович Г.Г., Хмельницкий А.И. Биологические мембраны. Минск.: БГУ, 2009, 184 с.
3. Черенкевич С.Н., Хмельницкий А.И. Транспорт веществ через биологические мембраны. Минск.: БГУ, 2007, 144 с.
4. Хмельницкий А.И., Василевская Н.В., Черенкевич С.Н. Структура и свойства ионных каналов биологических мембран. Минск.: БГУ, 2004, 167 с.
5. Рубин А.Б. Биофизика. Том 1, 2. М.: 2004.
6. Финкельштейн А.В., Птицын О.Б. Физика белка. М.: Университет, 2002.
7. Комяк, А. И. Молекулярная спектроскопия: учеб. пособие для студ. физ. фак. БГУ. Минск: БГУ, 2005.
8. Кудряшов Ю. Б. Радиационная биофизика (ионизирующие излучения) / Под ред. В.К. Мазурика, М.Ф. Ломанова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004, 448 с.
9. Ризниченко Г.Ю. Лекции по математическим моделям в биологии. – М-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2011, 560 с.
10. Медицинская и биологическая физика: учебник /А.Н. Ремизов. - 4-е изд., испр. и перераб. - М.: ГЭОТАР - Медиа, 2013. - 648 с. : ил.

**ДОПОЛНЕНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ К УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЕ  
КОМПЛЕКСНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭКЗАМЕНА**

на \_\_\_\_ / \_\_\_\_ учебный год

№ п/п	Дополнения и изменения	Основание

Учебная программа пересмотрена и одобрена на заседании кафедры  
\_\_\_\_\_ (протокол № \_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ 201\_ г.)

Заведующий кафедрой  
\_\_\_\_\_

УТВЕРЖДАЮ  
Декан факультета  
\_\_\_\_\_

