# ***Программа вступительного экзамена по направлению 1.3. Физические науки***

**Целью** вступительного испытания является оценка уровня освоения поступающим компетенций, необходимых для обучения по направлению ***1.3. «Физические науки»***по программам подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре.

**Программы вступительных испытаний при приеме на обучение в аспирантуре формируются** на основе требований Национального исследовательского Университета ИТМО. Экзамен проводится по билетам. Билет содержит 2 вопроса в соответствии с программой, а также вопрос о планируемом диссертационном исследовании абитуриента.

**Форма вступительного испытания:** устно-письменная

**Форма вступительного испытания с использованием дистанционных технологий:** тест, устно-письменная

**Продолжительность** проведения вступительного испытания. Продолжительность вступительного испытания - не более 90 минут.

**Критерии оценивания:** “неудовлетворительно”, “Удовлетворительно”, “Хорошо”, “Отлично”

**Минимальный проходной балл,** подтверждающий успешное прохождение вступительных испытаний: оценка “удовлетворительно”.

**Перечень принадлежностей**, которые поступающий имеет право пронести в аудиторию во время проведения вступительного испытания: письменные принадлежности, непрограммируемый калькулятор.

# **Научная специальность 1.3.2. «Приборы и методы экспериментальной физики»**

**1. Общие сведения по метрологии и средствам измерений**

1.1. Измерения и их элементы: физические величины, единицы, средства измерений, методы измерений, результат измерений и погрешность. Международная система единиц (СИ).

1.2. Средства измерений: виды средств измерений, параметры средств измерений и эталоны.

1.3. Погрешности измерений: случайные и систематические, статические и динамические, грубые. Способы обнаружения погрешностей, введение поправок.

**2. Хроматография и разделение веществ**

2.1. Современные методы разделения веществ. Краткая история развития современных методов разделения и хроматографии.

2.2. Классификация хроматографических методов по принципу разделения: адсорбционная, распределительная, ионообхенная, гель-хроматография, аффинная.

2.3. Классификация по способу разделения: фронтальный анализ, вытеснительная хроматография, проявительная хроматография.

2.4. Классификация хроматографии по характеру подвижной фазы: жидкостная, газовая, сверхкритическая флюидная. Основы теории жидкостной хроматографии, описание хроматографического процесса.

2.5. Понятия: "теоретическая тарелка"; время удерживания; удерживаемый объем; разрешение.

2.6. Элементы хроматографической техники: колонки, сорбенты, насосы, дозаторы, регистрирующие устройства, коллекторы фракций. Детекторы: фотометрический, рефрактометрический, флуориметрический, электрохимический.

2.7. Микроколоночная хроматография и ее особенности. Экстракционная и противоточная хроматография. Чувствительность, эффективность и пределы обнаружения хроматографических методов.

2.8. Препаративная жидкостная хроматография. Сочетание хроматографии с другими методами анализа вещества: хромато-масс-спектрометр.

2.9. Перспективы развития хроматографии: сверхкритическая флюидная, капиллярная, имуноаффинная.

2.10. Электромиграционные методы разделения веществ: электрофорез тонкослойный, гель-электрофорез, изотахофорез, изозлектрическое фокусирование.

2.11. Разделение веществ в полях различной физической природы (электрические, тепловые, магнитные поля, поле силы тяжести). Седиментационные методы (аналитическое и проточное

фракционирование, фильтрация и приборы для мембранных процессов.

2.12. Принципы иммуноферментного анализа (ИФА). Гомогенный и гетерогенный иммуноферментный анализ. ИФА на основе «ферментных» каналов, флуориметрический ИФА, ИФА на основе индикаторных полосок. Применение проточно–инжекционных систем и флуоресцентных меток в ИФА.

**3. Масс-спектрометрия, электронно-оптические и ионно-оптические приборы**

3.1. Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях. Уравнения движения в форме Ньютона и Лагранжа.

3.2. Законы подобия. Параксиальное приближение.

3.3. Электростатические линзы. Магнитные линзы.

3.4. Цилиндрический конденсатор и его фокусирующие свойства. Секторное магнитное поле, его фокусирующие и диспергирующие свойства.

3.5. Масс-спектрометрия как аналитический метод: классификация масс-спектрометрических методов по областям применения. Масс-спекрометр как физический и электронно-оптический прибор. Структурная схема масс-спектрометра, основные узлы и их назначение.

3.6. Источники ионов и виды ионизации (электронный удар, химическая ионизация, поверхностная ионизация, искровой разряд). Анализаторы. Детекторы ионов.

3.7. Типы масс - спектрометров: статические магнитные, статические с двойной фокусировкой, динамические безмагнитные (времяпролетные и квадрупольные), масс-спектрометры, ион – циклотронного резонанса.

3.8. Основные, характеристики масс-спектрометрии: разрешающая способность, диапазон масс, чувствительность, точность определения массы и амплитуды сигнала.

**4. Методы резонансной спектроскопии**

4.1. Основы ядерного магнитного резонанса (ЯМР). Ядерные моменты.

4.2. Ядра во внешнем магнитном поле. Свободная и вынужденная прецессия. Уравнение Блоха.

4.3. Ядерный магнитный резонанс. Макроскопическая теория ЯМР. Методы наблюдения ЯМР. Ширина и контур линий ЯМР.

4.4. Ядерная спин-решетчатая и спин-спиновая релаксация. Тонкая структура линий ЯМР.

4.5. Импульсные методы ЯМР. Фурье-спектроскопия ЯМР. Спектрометры ЯМР: основные элементы и принципы работы.

4.6. Постоянные магниты, электромагниты. Сверхпроводящие магниты.

4.7. Квадрупольные эффекты в ЯМР-спектрах. Ядерный квадрупольный резонанс и спектроскопия ЯКР.

4.8. Методы детектирования ЯКР: стационарные методы наблюдения ЯКР, импульсные методы наблюдения ЯКР.

4.9. Электронный парамагнитный резонанс (ЭПР). Основные положения. Ширина линий и сверхтонкая структура ЭПР.

4.10. Техника – ЭПР-спектроскопии. Основные элементы ЭПР спектрометров.

4.11. Эффект Мессбауэра, резонансное рассеяние или поглощение веществом гамма-квантов.

4.12. Основные элементы спектрометра Мессбауэра: источники, детекторы, прецизионные системы перемещения.

**5. Методы и приборы для исследования твердого тела**

5.1. Эмиссионные методы исследования. Термоэлектрическая эмиссия. Автоэлектронная и авто-ионная эмиссия.

5.2. Термическая десорбция. Экзоэлектронная эмиссия. Туннельная микроскопия и спектроскопия.

5.3. Оптическая микроскопия: формирование изображения, разрешение, оптические аберрации, конструкция микроскопа, освещение по Келеру, методы увеличения контраста.

5.4. Методы оптического секционирования: деконволюция, структурированное освещение, конфокальные методы, плоскостное освещение, многофотонное поглощение и подное внутреннее отражение.

5.5. Флуоресцентная оптическая микроскопия и измерения с временным разрешением. Микроскопия визуализации времени жизни флуоресценции.

5.6. Флуоресцентная корреляционная спектроскопия. Флуоресцентный резонансный перенос энергии.

5.7. Акустические методы исследования. Генерация и детектирование поверхностных акустических волн (ПАВ) .

5.8. Зондирование поверхности электронами и позитронами. Дифракция быстрых и медленных электронов. Виды спектроскопии характеристических потерь энергии.

5.9. Вторичная электронная спектроскопия. Спектроскопия потенциалов появления.

5.10. Зондирование электромагнитным излучением. Инфракрасная спектроскопия поглощения и внутреннего отражения. Фотоэлектронная спектроскопия. Электронная спектроскопия для химического анализа (ЭСХА).

5.11. Мессбауэровская спектроскопия поверхности. Фотоакустическая спектроскопия. Эллипсометрия и спектроэллипсометрия.

5.12. Зондирование поверхности ионами или нейтральными частицами. Масс-спектрометрия вторичных ионов. Ионно-электронная эмиссия.

5.13. Спектроскопия рассеяния быстрых и медленных ионов. Метод рассеяния молекулярного пучка.

5.14. Методы подготовки поверхности и необходимые вакуумные условия. Аппаратура для реализации этих условий.

5.15. Методы получения сверхвысокого вакуума. Насосы электроразрядные, турбомолекулярные, ионно-сорбционные, геттерные, криогенные.

5.16. Сканирующая электронная и ионно-пучковая литография; молекулярно-лучевая эпитаксия: принципы методов и аппаратура.

5.17. Источники потоков заряженных и нейтральных частиц и электромагнитного излучения. Источники ионной имплантации поверхностей, молекулярные источники.

5.18. Основные источники излучения в видимом УФ, ВУФ, рентгеновском и гамма диапазонах.

**6. Оптические методы и приборы ИК- и УФ-спектроскопии. Лазеры и лазерная спектроскопия**

6.1. Методы спектрального разложения и дисперсионные элементы оптических приборов, применяемые в оптике: призмы, дифракционные решетки, интерферометры, эшелоны и элелетты, Фурье-анализ и Фурье-спектрометры. Селекция оптического излучения, фильтры абсорбционные, интерферометрические, интерференционно-поляризационные.

6.2. Основные типы спектральных приборов: спектрограф, монохроматограф, полихроматограф, спектрометр, квантометр, интерферометр. Приборы на основе волоконно-оптических элементов. Основные характеристики оптических приборов: дисперсия, разрешающая сила, светосила, пропускание, поляризующие свойства спектральных приборов.

6.3. Методы оптической спектроскопии. Атомно-эмиссионная и атомно-абсорбционная спектроскопия. УФ- и ИК-молекулярная спектроскопия. Флуориметрия. Поляриметрия. Эллипсометрия. Светорассеяние.

6.4. Приемники оптического излучения: фотоэмульсии, термопластики, фотоэлементы, фотоумножители, болометры, лавинные фотодиоды и гибридные детекторы, многоэлементные приемники излучения – фотодиодные линейки, микроканальные пластины, ПЗС.

6.5. Цифровое формирование изображений, типы сенсоров. Камеры на основе ПЗС и КМОП: чувствительность, поле зрения, скорость, разрешение, динамический диапазон.

6.6. Источники излучения для оптической спектроскопии: классификация, цветовая температура, дуговые лампы, светодиоды.

6.7. Лазеры. Понятия о спонтанном и вынужденном излучении. Двух- и трехуровневая схемы, лазерного излучения. Основные типы лазеров: газовые (ионные, молекулярные), твердотельные, полупроводниковые, жидкостные. Лазеры как источники света для спектроскопии. Лазеры как стандарты частоты.

6.8. Оптические резонаторы. Спектральные, временные и пространственные характеристики лазерного излучения. Нелинейные оптические среды. Генерация, гармоник, суммарной и разностной частот. Параметрическое усиление и генерация. Приемники лазерного излучения.

6.9. Формирование и измерение пико- и фемтосекундных лазерных импульсов. Методы лазерной спектроскопии. Лазерная абсорбционная и флуоресцентная спектроскопия. Внутрирезонаторная спектроскопия. Много-фотонная: спектроскопия.

6.10. Оптоакустическая спектроскопия. Внутридопплеровская лазерная спектроскопия высокого разрешения. Лазерная спектроскопия с временным разрешением, пикосекундная и фемтосекундная спектроскопия.

**7. Аппаратные и программные средства автоматизации**

7.1. Системы автоматизации измерений и управления в физическом эксперименте, и аналитическом приборостроении. Функции ЭВМ и устройств связи с объектом. Магистрально-модульные системы.

7.2. Структура современных измерительно – вычислительных комплексов: состав, основные измерительные и управляющие модули, характеристик ИВК, средства измерений (АЦП, УВХ, коммутаторы), средства выдачи непрерывных сигналов, средства коммутации и ввода-вывода дискретных сигналов.

7.3. Элементная база современной микро-схемотехники (ТТЛ, ЭСЛ, КМОП) Основные схемы: счетчики, регистры, дешифраторы, мультиплексоры, запоминающие устройства, комбинационные схемы. Заказные и полу-заказные БИС.

7.4. Архитектура мини- и микро-ЭВМ, используемых в автоматизации эксперимента: процессор, магистраль, организация памяти, способы адресации. Основные команды. Работа с внешними устройствами. Прерывания и их обработка. Прямой доступ к памяти. Набор внешних устройств.

7.5. Микропроцессорная техника в системе автоматизации эксперимента (580, 1810, 1801, 1816) – процессорные БИС, интерфейсы. Интерфейсы систем автоматизации эксперимента. Принципы организации аппаратуры

7.6. КАМАК - конструктив, электрический и логический стандарты, построение систем. Понятие о "Евроконструктиве", интерфейсах типа VМЕ, И41. Последовательные интерфейсы (ИРПС, С2).

7.7. Локальные сети ЭВМ - архитектура, методы доступа, протоколы управления.

7.8. Программное обеспечение ИВК: системное и прикладное. Операционные системы и их компоненты (мониторы, трансляторы, компоновщики, утилиты). Языки программирования (ФОРТРАН, ПАСКАЛЬ, АССЕМБЛЕР), средства отладки и редактирования. Примеры ОС: РАФОС, ДЕМОС, МS-DOS, СР/М.

7.9. Разработка программного обеспечения для мини- и микро-ЭВМ. Структура данных, управляющие структуры. Организация работы в реальном времени. Методы организации программ и данных.

7.10. Основные алгоритмы цифровой обработки сигналов. Предварительная обработка экспериментальных данных: статистическая, оптимальное сглаживание, линейная фильтрация, спектральные преобразования. Обнаружение пиков, удаление фона, разделение компонент.

# **Рекомендованная литература для профиля 1.3.2. «Приборы и методы экспериментальной физики»**

1. Бурдун Г. Д., Марков Б. Н. Основы метрологии. М.: Изд. стандартов, 1985.
2. Дупин–Борковский И. В. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения. М.: Изд. стандартов, 1987.
3. Энгельгардт Х. Жидкостная хроматография при высоких давлениях. М.: Мир, 1980.
4. Лабораторное руководство по хроматографическим и смежным методам. Под ред. О.Микеша. М.: Мир, 1986, т. 1, 2.
5. Хроматография. Под ред. Э. Хертмана. М.: Мир, 1986, т 1, 2.
6. Сакодынский К.И. и др. Приборы для хроматографии. М.: Машиностроение.
7. Михофер Г. (ред.) Иммуноферментный анализ. М.: Мир, 1988.
8. Сысоев А.А., Чупахин М.С. Введение в масс-спектрометрию. М.: Атомиздат, 1977.
9. Чепмен Дж., Практическая органическая масс-спектрометрия. М.: Мир, 1988.
10. Сысоев А.А., Физика и техника масс-спектрометрических приборов и электромагнитных установок. М.: Энгергоатомиздат, 1983.
11. Баранова Л.А., Явор С. Я. Электростатические электронные линзы. М.: Наука, 1976.
12. Слиткер Ч. Основы теории магнитного резонанса. М.: Мир, 1981.
13. Гюнтер Х. Введение в курс спектроскопии ЯМР. М.: Мир, 1980.
14. Вертхейм Г. Эффект Мессбауэра. Принципы и применение.
15. Анализ поверхности методами Оже- и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Под ред. Д. Бриг и М. Сиха. М.: Мир, 1987.
16. Нефедов В. М., Черепин В. Т. Физические методы исследования поверхности твердых тел. М.: Наука, 1983.
17. Броудой Н., Мерей Дж. Физические основы микротехнологии.
18. Уэстон Дж. Техника сверхвысокого вакуума. М.: Мир, 1988.
19. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973.
20. Скоков И. В. Оптические спектральные приборы. М.: Машиностроение, 1984.
21. Демтродер В. Лазерная спектроскопия. М.: Наука, 1985.
22. Кондигенко И. И. и др. Физика лазеров. Киев.: Вища школа, 1986, 231с.
23. Певчев Ю.Ф., Финогенов К.Г. Автоматизация физического эксперимента. М.:Энергоатомиздат, 1986.
24. Задков В.Н., Пономарев Ю.В. Компьютер в эксперименте, архитектура и программные средства систем автоматизации. М.: Наука, 1988.
25. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. – в 2-х томах, М.: Мир, 1983.
26. Мячев А.А., Иванов В. В. Интерфейсы вычислительных систем на базе мини- и микро – ЭВМ. – М.: Радио и связь, 1986.
27. Микропроцессоры. в 3-х томах, под ред. Л.Н. Преснухина, Военная школа, 1983.

# **Specialization 1.3.2. Instruments and methods of experimental physics**

**1. General knowledge of metrology and measuring instruments**

1.1. Measurements and their elements: physical quantities, units, instruments, measurement methods, measurement results, and error. The International System of Units (SI).

1.2. Measurement instruments: types of measurement instruments, their specifications and standards.

1.3. Measurement errors: random and systematic, static and dynamic, crude errors. Means of error detection and introduction of corrections.

**2. Chromatography and separation of substances**

2.1. Modern separation methods. Brief history of the development of modern separation methods and chromatography.

2.2. Classification of chromatography methods by separation principle: adsorption, partition, ion-exchange, affinity, gel chromatography.

2.3. Classification of chromatography methods by separation method: frontal analysis, displacement chromatography, elution chromatography.

2.4. Classification of chromatography methods by mobile phase type: liquid, gas, supercritical fluid chromatography. The basics of liquid chromatography, description of the chromatography process.

2.5. Concepts: theoretical plate; retention time; retention volume; resolution.

2.6. Elements of chromatographic equipment: columns, sorbents, pumps, injectors, logging devices, fraction collectors. Detectors: photometric detectors, refractometers, fluorescence detectors, electrochemical detectors.

2.7. Microcolumn chromatography and its features. Extraction chromatography and countercurrent chromatography. Sensitivity, efficiency, and detection limits of chromatography methods.

2.8. Preparative liquid chromatography. Combining chromatography with other substance analysis methods: chromatograph-mass spectrometer.

2.9. Prospects of chromatography development: supercritical fluid chromatography, capillary chromatography, immunoaffinity chromatography.

2.10. Electromigration separation methods: thin-layer electrophoresis, gel electrophoresis, isotachophoresis, isoelectric focusing.

2.11. Substance separation in fields of different physical nature (electrical, thermal, magnetic fields, gravitational field). Sedimentation methods (analytical and field-flow fractionation, filtration, and devices for membrane processes).

2.12. Principles of enzyme immunoassay (EIA). Homogeneous and heterogeneous EIA. EIA based on enzyme channels, fluorometric EIA, EIA with reagent strips. The use of flow-injection systems and fluorescent tags in EIA.

**3. Mass spectrometry, electro-optical and ion-optical devices**

3.1. Movement of charged particles in electric and magnetic fields. Equations of motion (Newton’s laws and Lagrange’s equations).

3.2. Similarity laws. Paraxial approximation.

3.3. Electrostatic lens. Magnetic lens.

3.4. Cylindrical capacitor and its focusing properties. Sector magnetic field, its focusing and dispersive properties.

3.5. Mass spectrometry as an analytical method: classification of mass spectrometry methods by fields of application. Mass spectrometer as a physical and electro-optical device. Block diagram of a mass spectrometer, its major components and their purpose.

3.6. Ion sources and types of ionization (electron impact ionization, chemical ionization, surface ionization, spark source ionization). Analyzers. Ion detectors.

3.7. Types of mass spectrometers: static magnetic mass spectrometers, double-focusing mass spectrometers, dynamic non-magnetic (time-of-flight and quadrupole) mass spectrometers, ion cyclotron resonance mass spectrometers.

3.8. Main properties of mass spectrometry: resolving power, mass range, sensitivity, accuracy of mass and signal amplitude measurements.

**4. Resonance spectroscopy methods**

4.1. Fundamentals of nuclear magnetic resonance (NMR). Nuclear moments.

4.2. Nuclei in the external magnetic field. Free and forced precession. Bloch equation.

4.3. Nuclear magnetic resonance. Macroscopic NMR theory. NMR observation methods. Line width and line shape in NMR.

4.4. Nuclear spin-lattice and spin-spin relaxation. Fine structure of NMR lines.

4.5. NMR pulse techniques. Fourier transform NMR spectroscopy. NMR spectrometers: key elements and operating principles.

4.6. Permanent magnets, electromagnets. Superconducting magnets.

4.7. Quadrupole effects in NMR spectra. Nuclear quadrupole resonance and NQR spectroscopy.

4.8. NQR detection techniques: stationary NQR observation methods, pulse NQR observation methods.

4.9. Electron paramagnetic resonance (EPR). Fundamental principles. Line width and hyperfine structure of EPR.

4.10. EPR spectroscopy techniques. Key elements of EPR spectrometers.

4.11. Mössbauer effect, resonant scattering or absorption of gamma-quanta in solids.

4.12. Key elements of a Mössbauer spectrometer: sources, detectors, precision positioning systems.

**5. Techniques and devices for studying solids**

5.1. Emission methods for research. Thermoelectric emission. Field electron emission and field ion emission.

5.2. Thermal desorption. Exoelectron emission. Tunneling microscopy and spectroscopy.

5.3. Optical microscopy: image formation, resolution, optical aberrations, microscope construction, Köhler illumination, contrast-enhancing techniques.

5.4. Optical sectioning methods: deconvolution, structured illumination, confocal methods, light sheet illumination, multi-photon absorption and total internal reflection.

5.5. Fluorescence light microscopy and time-resolved measurements. Fluorescence lifetime imaging (FLIM).

5.6. Fluorescence correlation spectroscopy (FCS). Fluorescence resonance energy transfer (FRET).

5.7. Acoustic research methods. Generation and detection of surface acoustic waves (SAW).

5.8. Characterization of surface with electrons and positrons. High-energy and low-energy electron diffraction. Types of energy loss spectroscopy.

5.9. Secondary electron spectroscopy. Appearance potential spectroscopy.

5.10. Characterization by electromagnetic emission. Infrared reflection–absorption spectroscopy. Photoemission spectroscopy. Electronic spectroscopy for chemical analysis (ESCA).

5.11. Surface Mössbauer spectroscopy. Photoacoustic spectroscopy. Ellipsometry and spectral ellipsometry.

5.12. Surface probing with ions or neutral particles. Secondary-ion mass-spectrometry. Ion-induced electron emission.

5.13. High-energy and low-energy ion scattering spectrometry. Molecular beam scattering method.

5.14. Surface treatment methods and required vacuum conditions. Equipment that is necessary for realizing these vacuum conditions.

5.15. Methods for achieving ultra-high vacuum. Sputter-ion pumps, turbomolecular pumps, ion getter pumps, getter pumps, cryogenic pumps.

5.16. Scanning electron-beam and ion-beam lithography; molecular-beam epitaxy: operating principles of methods and the corresponding equipment.

5.17. Sources of charged and neutral particles and sources of electromagnetic emission. Ion implantation sources, molecular sources.

5.18. Key sources of emission in UV, VUV, X-ray, and gamma range.

**6. Optical methods and devices of IR and UV spectroscopy. Lasers and laser spectroscopy**

6.1. Spectral decomposition methods and dispersive elements of optical devices used in optics: prisms, diffraction gratings, interferometers, echelons and echelettes, Fourier analysis and Fourier spectrometers. Selection of optical emission, absorption filters, interferometric filters, interference-polarizing filters.

6.2. Main types of spectral devices: spectrograph, monochromator, polychromator, spectrometer, quantometer, interferometer. Devices based on fiber-optic elements. Key properties of optical devices: dispersion, resolving power, luminosity, transmittance, polarization properties of spectral devices.

6.3. Optical spectroscopy methods. Atomic emission and atomic absorption spectroscopy. UV and IR molecular spectroscopy. Fluorimetry. Polarimetry. Ellipsometry. Light scattering.

6.4. Optical emission receivers: photographic emulsions, thermoplastics, photovoltaic cells, photomultipliers, bolometers, avalanche photodiodes and hybrid detectors, multielement detectors – linear photodiode arrays, microchannel plates, charge-coupled devices (CCD).

6.5. Digital imaging, types of camera sensors. CCD and CMOS-based cameras, sensitivity, field of view, imaging speed, resolution, dynamic range.

6.6. Illumination sources for optical spectroscopy: classification, color temperature, arc lamps, light-emitting diodes (LEDs).

6.7. Lasers. Spontaneous and stimulated emission. Two- and three-level systems for laser emission. Key types of lasers: gas (ion, molecular), solid-state, semiconductor, and liquid lasers. Lasers as light sources for spectroscopy. Lasers as frequency standards.

6.8. Optical resonators. Spectral, temporal and spatial properties of laser emission. Nonlinear optical media. Harmonic generation, sum-frequency generation and difference-frequency generation. Parametric amplification and generation. Laser receivers.

6.9. Generation and measurement of pico- and femtosecond laser pulses. Laser spectroscopy techniques. Laser absorption and fluorescence spectroscopy. Cavity-enhanced spectroscopy. Multiphoton spectroscopy.

6.10. Optoacoustic spectroscopy. High-resolution sub-Doppler laser spectroscopy. Time-resolved laser spectroscopy, picosecond and femtosecond spectroscopy.

**7. Hardware and software automation means**

7.1. Automation systems of measurement and control in a physical experiment and for equipment engineering. Functions of computers and remote terminal units. Modular crate electronics.

7.2. The structure of modern measurement and calculation systems: elements base, key measurement and control modules, properties of computing systems, means of measurement (ADC, sample-and-hold circuit, packet switching devices), means of continuous signal output, switching hubs and means of input-output of discrete signals.

7.3. Main hardware components of modern micro-circuitry (TTL, ECL, CMOS). Key circuits: meters, registers, decoders, multiplexers, data storage devices, combinatorial circuits. Custom and semi-custom LSI.

7.4. Architecture of mini- and microcomputers used in experiment automation: processor, backbone, memory organization, addressing modes. Key commands. Work with external devices. Interruptions and their processing. Direct access to memory. Set of external devices.

7.5. Microprocessor technology in experiment automation systems (580, 1810, 1801, 1816) – processor LSI and interfaces. Interfaces of experiment automation systems. Principles of organizing equipment.

7.6. CAMAC – construction, electrical and logical standards, system organization. VMEbus, VME interface, model 41 interface. Serial interfaces (digital current loop, C2).

7.7. Local networks: architecture, access methods, control protocols.

7.8. Software for measurement and calculation systems: system software and application software. OS and their components (monitors, translators, compilers, utilities). Programming languages (Fortran, Pascal, assembly language), debugging and editing tools. Examples of OS: RT-11, DEMOS, MS-DOS, CP/M.

7.9. Development of software for mini- and macro- computers. Data structure and control structures. Organization of operation in real-time mode. Methods for organizing programs and data.

7.10. Key algorithms of digital signal processing. Preprocessing of experimental data: statistical preprocessing, optimal smoothing, linear filtering, spectral transformation. Peak detection, background removal, component separation.

# **Recommended literature for specialization 1.3.2. Instruments and methods of experimental physics**

1. Бурдун Г. Д., Марков Б. Н. Основы метрологии. М.: Изд. стандартов, 1985.
2. Дупин–Борковский И. В. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения. М.: Изд. стандартов, 1987.
3. Энгельгардт Х. Жидкостная хроматография при высоких давлениях. М.: Мир, 1980.
4. Лабораторное руководство по хроматографическим и смежным методам. Под ред. О.Микеша. М.: Мир, 1986, т. 1, 2.
5. Хроматография. Под ред. Э. Хертмана. М.: Мир, 1986, т 1, 2.
6. Сакодынский К.И. и др. Приборы для хроматографии. М.: Машиностроение.
7. Михофер Г. (ред.) Иммуноферментный анализ. М.: Мир, 1988.
8. Сысоев А.А., Чупахин М.С. Введение в масс-спектрометрию. М.: Атомиздат, 1977.
9. Чепмен Дж., Практическая органическая масс-спектрометрия. М.: Мир, 1988.
10. Сысоев А.А., Физика и техника масс-спектрометрических приборов и электромагнитных установок. М.: Энгергоатомиздат, 1983.
11. Баранова Л.А., Явор С. Я. Электростатические электронные линзы. М.: Наука, 1976.
12. Слиткер Ч. Основы теории магнитного резонанса. М.: Мир, 1981.
13. Гюнтер Х. Введение в курс спектроскопии ЯМР. М.: Мир, 1980.
14. Вертхейм Г. Эффект Мессбауэра. Принципы и применение.
15. Анализ поверхности методами Оже- и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Под ред. Д. Бриг и М. Сиха. М.: Мир, 1987.
16. Нефедов В. М., Черепин В. Т. Физические методы исследования поверхности твердых тел. М.: Наука, 1983.
17. Броудой Н., Мерей Дж. Физические основы микротехнологии.
18. Уэстон Дж. Техника сверхвысокого вакуума. М.: Мир, 1988.
19. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973.
20. Скоков И. В. Оптические спектральные приборы. М.: Машиностроение, 1984.
21. Демтродер В. Лазерная спектроскопия. М.: Наука, 1985.
22. Кондигенко И. И. и др. Физика лазеров. Киев.: Вища школа, 1986, 231с.
23. Певчев Ю.Ф., Финогенов К.Г. Автоматизация физического эксперимента. М.:Энергоатомиздат, 1986.
24. Задков В.Н., Пономарев Ю.В. Компьютер в эксперименте, архитектура и программные средства систем автоматизации. М.: Наука, 1988.
25. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. – в 2-х томах, М.: Мир, 1983.
26. Мячев А.А., Иванов В. В. Интерфейсы вычислительных систем на базе мини- и микро – ЭВМ. – М.: Радио и связь, 1986.
27. Микропроцессоры. в 3-х томах, под ред. Л.Н. Преснухина, Военная школа, 1983.

# **Научная специальность 1.3.3. «Теоретическая физика»**

**Общая часть**

1. Обобщенные координаты. Функция Лагранжа. Принцип наименьшего действия. Законы сохранения импульса, момента импульса и энергии.
2. Движение в центральном поле. Интегралы движения. Уравнение траекторий.
3. Рассеяние частиц неподвижным силовым центром. Дифференциальное сечение рассеяния. Формула Резерфорда.
4. Функция Гамильтона. Каноническая система уравнений.
5. Уравнение Шредингера. Свободная частица и частица в потенциальной яме. Туннельный эффект. Прохождение квантовой частицы через барьер.
6. Нестационарная теория возмущений в квантовой теории: Вероятность квантовых переходов, золотое правило Ферми. Статистика процесса квантовых переходов. Квазистационарные состояния. Ширина энергетических уровней.
7. Оператор момента количества движения. Орбитальный, спиновой и полный момент.
8. Частица в центральном поле. Спектр атома водорода.
9. Уравнение Шредингера для системы, состоящей из одинаковых частиц: Симметричные и антисимметричные волновые функции. Метод самосогласованного поля Хартри — Фока. Статистический метод Томаса — Ферми.
10. Рассеяние быстрых частиц. Приближение Борна.
11. Функции Блоха и функции Ваннье.
12. Зонная структура спектра электрона в твердом теле. Модель Кронига-Пенни
13. Энтропия. Закон возрастания энтропии. Статистика Больцмана, Статистики Бозе-Эйнштейна и Ферми-Дирака.
14. Конденсация Бозе –Эйнштейна для трехмерного идеального газа. Сверхтекучесть.
15. Уравнение Клейна — Гордона. Уравнение Дирака. Их физический смысл, решения (для свободной частицы) и основные свойства. Частицы и античастицы.

**Специальная часть**

Математический аппарат теоретической физики

1. Условный экстремум интегрального функционала.
2. Поля экстремалей. Уравнение Гамильтона-Якоби.
3. Метод разделения переменных.
4. Функция Грина для задачи Дирихле оператора Лапласа. Формула Пуассона.
5. Метрические пространства. Полные метрические пространства. Принцип сжимающих отображений.
6. Банаховы и гильбертовы пространства.
7. Ограниченные операторы в банаховых и гильбертовых пространствах.
8. Замкнутые операторы в гильбертовом пространстве. Сопряженный оператор.
9. Симметричные и самосопряженные операторы.
10. Спектр и резольвента.
11. Задача на собственные функции и собственные значения для эрмитовых операторов.
12. Интегральные уравнения Вольтерра.
13. Резольвента Фредгольма. Теоремы Фредгольма для интегральных уравнений.
14. Обобщенные функции.
15. Вторичное квантование. Операторы рождения и уничтожения и их свойства.

# **Рекомендованная литература для профиля 1.3.3. «Теоретическая физика»**

1. Л. Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Курс теоретической физики. Учебное пособие для вузов.

· Том I. Механика

· Том II. Теория поля

· Том III. Квантовая механика. Нерелятивистская теория

· Том IV. Квантовая электродинамика (Авторы: В. Б. Берестецкий, Е. М. Лифшиц, Л. П. Питаевский)

· Том V. Статистическая физика. Часть 1.

 Том. IX. Статистическая физика. Часть 2. (Авторы: Е. М. Лифшиц, Л.П. Питаевский

1. Давыдов А. С. Квантовая механика: учеб. пособие. — 3 изд., стереотипное. — СПб.: БХВ-Петербург, 2011. — 704 с.:
2. Морс Ф.М., Фешбах Г., Методы теоретической физики. Т.1 и Т.2, 1958-1960г., изд-во: Издательство Иностранной литературы., : Москва
3. Пескин М., Шрёдер Д. Введение в квантовую теорию поля. — Ижевск: РХД, 2001. — 784 с.
4. Березин Ф. А. Метод вторичного квантования. — 2-е изд., доп. — М.: Наука, 1986. — 320 с.
5. Васильева А. Б., Тихонов Н.А. Интегральные уравнения. - 2-е изд., стереот. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. - 160 с.

# **Specialization 1.3.3. Theoretical physics**

**General part**

1. Generalizedcoordinates. Lagrangian function. Principle of least action. The law of conservation of momentum, the law of conservation of angular momentum, the law of conservation of energy.
2. Motion in central-force field. Constants of motion. Trajectory equation.
3. Scattering of particles by a stationary *central force* (a stationary source of the central field). Differential scattering cross-section. Rutherford function.
4. Hamiltonian function. Canonical system of equations.
5. Schrödinger equation. An unbound particle and a particle in a finite potential well. Tunnel effect. Passage of a quantum particle through a barrier.
6. Time-dependent perturbation theory in quantum theory. Quantum transition rate (probability), Fermi's golden rule. Statistics of the quantum transition process. Quasi-stationary states. Energy level width.
7. Angular momentum operator. Spin, orbital and total angular momentum.
8. A particle in a central field. Hydrogen spectral series.
9. Schrödinger equation for a system of identical particles. Symmetric and antisymmetric wave functions. Hartree-Fock self-consistent field method. The Thomas-Fermi statistical model.
10. Scattering of fast particles. Born approximation.
11. Bloch functions and Wannier functions.
12. Electronic band structure in solids. The Kronig-Penney model.
13. Entropy. The principle of increase of entropy. Boltzmann statistics, Bose-Einstein statistics, and Fermi–Dirac statistics.
14. Bose-Einstein condensation of a three-dimensional ideal gas. Superfluidity.
15. Klein-Gordon equation. Dirac equation. Their physical meaning, solutions (for a free particle), and main properties. Particles and antiparticles.

**Special part**

Mathematical methods of theoretical physics

1. Conditional extremum of an integral functional.
2. Fields of extremals. Hamilton-Jacobi equation.
3. Separation of variables.
4. Green function of the Dirichlet problem for the Laplace operator. Poisson formula.
5. Metric space. Complete metric spaces. Contraction mapping principles.
6. Banach and Hilbert spaces.
7. Bounded operators in Banach and Hilbert spaces.
8. Closed operators in Hilbert spaces. Hermitian adjoint.
9. Symmetrical and self-adjoint operators.
10. Spectrum and resolvent.
11. igenfunctions and eigenvalues problems for Hermitian operators.
12. Volterra integral equations.
13. Fredholm resolvent. Fredholm theorem for integral equations.
14. Generalized functions.
15. Second quantization. Creation and annihilation operators and their properties.

# **Recommended literature for specialization 1.3.3. Theoretical physics**

1. Л. Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Курс теоретической физики. Учебное пособие для вузов.

· Том I. Механика

· Том II. Теория поля

· Том III. Квантовая механика. Нерелятивистская теория

· Том IV. Квантовая электродинамика (Авторы: В. Б. Берестецкий, Е. М. Лифшиц, Л. П. Питаевский)

· Том V. Статистическая физика. Часть 1.

 Том. IX. Статистическая физика. Часть 2. (Авторы: Е. М. Лифшиц, Л.П. Питаевский

1. Давыдов А. С. Квантовая механика: учеб. пособие. — 3 изд., стереотипное. — СПб.: БХВ-Петербург, 2011. — 704 с.:
2. Морс Ф.М., Фешбах Г., Методы теоретической физики. Т.1 и Т.2, 1958-1960г., изд-во: Издательство Иностранной литературы., : Москва
3. Пескин М., Шрёдер Д. Введение в квантовую теорию поля. — Ижевск: РХД, 2001. — 784 с.
4. Березин Ф. А. Метод вторичного квантования. — 2-е изд., доп. — М.: Наука, 1986. — 320 с.
5. Васильева А. Б., Тихонов Н.А. Интегральные уравнения. - 2-е изд., стереот. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. - 160 с.

# **Научная специальность 1.3.4. «Радиофизика»**

**1. Линейные и нелинейные колебательные системы**

1.1. Динамические системы. Понятия состояния, движения и колебаний. Число степеней свободы и порядок динамических систем. Фазовое пространство и фазовые траектории как описание колебательных процессов. Методы определения фазовых траекторий. Изоклины и интегральные кривые. Элементы фазового портрета. Особые точки типа центр, фокус, узел, седло.

1.2. Собственные колебания в линейных системах с одной степенью свободы. Уравнение гармонического осциллятора и его решение. Потери в линейных колебательных системах. Собственные колебания в системе двух связанных осцилляторов. Гармоническое воздействие на систему двух связанных осцилляторов.

1.3. Колебание в упорядоченных структурах. Цепочка из связанных осцилляторов. Предельный переход от упорядоченных структур к одномерной сплошной среде. Временная и пространственная дисперсия.

1.4. Вынужденные колебания в линейных системах и системах со слабой нелинейностью. Примеры решения уравнения гармонического осциллятора с заданным внешним воздействием. Силовое и параметрическое воздействие.

1.5. Автоколебательные системы и методы их анализа. Примеры автоколебательных систем с одной и двумя степенями свободы. Энергетические соотношения в автоколебательных системах.

1.6. Параметрические системы. Усиление и генерация колебаний в параметрических системах. Уравнения Менли-Роу. Преобразование частоты в периодических системах.

1.7. Устойчивость колебательных систем. Определение устойчивости по Ляпунову. Методы исследования устойчивости стационарных режимов динамических систем. Хаотические колебательные системы. Странный аттрактор. Особенности фазового портрета хаотической динамической системы.

1.8. Собственные и вынужденные колебания в системах с распределенными параметрами. Примеры систем с распределенными параметрами. Волновое уравнение. Фазовая скорость. Дисперсия в системе с распределенными параметрами. Метод разложения по собственным модам при анализе внешнего силового воздействия на распределенные системы.

1.9. Автоколебательные системы на основе систем с распределенными параметрами. Условия самовозбуждения. Одномодовый и многомодовый режимы генерации.

**2. Генерирование и преобразование сигналов**

2.1. Квантовые стандарты частоты и времени радиочастотного и оптического диапазонов. Примеры и принципы работы.

2.2. Передача сигналов в волноведущих структурах. Волноводы, длинные линии, волоконные световоды. Критическая частота волновода. Волноводные моды.

2.3. Волны в металлических волноводах. Волны TE, TM, TEM типов. Групповая и фазовая скорости. Объемные резонаторы.

2.4. Взаимодействие потока заряженных частиц со сверхвысокочастотным электромагнитным полем. Группировка носителей зарядов. Принципы передачи и отбора энергии при взаимодействии потока заряженных частиц с полем резонатора. Принципы усиления сверхвысокочастотных сигналов в электронно-вакуумных устройствах.

2.5. Принципы работы и устройство электронно-вакуумных приборов усиления и генерации мощности: лампы бегущей волны, пролетного клистрона, лампы обратной волны, магнетрон, отражательный клистрон.

2.6. Полупроводниковые генераторы СВЧ: генераторы на полевом транзисторе, туннельном диоде, диоде Ганна. Усилитель на основе диода Ганна.

2.7. Явление ядерного магнитного резонанса и его применения. Взаимодействие спинов ядер с радиочастотным магнитным полем. Принципы работы магнитно-резонансной томографии.

2.8. Принципы управления светом. Пространственная модуляция показателя преломления акустической волной. Акустооптические устройства: модуляторы, дефлекторы, фильтры. Управление светом при помощи электрооптического и магнитооптического эффектов.

**3. Излучение, распространение и прием электромагнитных волн**

3.1. Уравнения электромагнитного поля. Граничные условия. Материальные параметры изотропных и анизотропных сред. Уравнения Максвелла для гармонического режима. Лемма Лоренца. Теорема взаимности.

3.2. Электродинамические потенциалы и векторы Герца. Метод функции Грина. Элементарные источники поля: диполь Герца, магнитный диполь, источник Гюйгенса.

3.3. Излучение электромагнитных волн электрическим диполем Герца. Понятия ближней, промежуточной и дальней зоны (зоны излучения). Диаграмма направленности. Коэффициент направленного действия и коэффициент усиления. Виды антенн радиочастотного диапазона. Оптические наноантенны.

3.4. Периодические структуры. Фазированные активные решетки. Принципы получения направленного излучения и управления главным максимумом диаграммы направленности. Отражательные и проходные решетки.

3.5. Дифракция электромагнитных волн на периодических структурах: отражательные и проходные дифракционные решетки. Электромагнитные метаматериалы и метаповерхности.

3.6. Явление дифракции электромагнитных волн. Дифракция плоской волны на бесконечном металлическом цилиндре. Дифракция плоской волны на металлической сфере. Строгое решение методом разделения переменных. Понятие об эффективной поверхности рассеяния.

3.7. Асимптотические методы расчета поля излучения: метод физической оптики. Метод геометрической оптики. Примеры применения к расчету волновых фронтов.

3.8. Излучение из прямоугольной апертуры в металлическом экране. Приближение Кирхгофа. Принципы работы и параметры зеркальных и линзовых антенн радиочастотного диапазона.

3.9. Излучение абсолютно черного тела. Закон Стефана-Больцмана. Закон Вина. Формула Планка. Виды шумов в радиодиапазоне.

3.10. Распространение электромагнитных волн в анизотропных средах. Волны в холодной плазме. Волны в намагниченном феррите. Эффект Фарадея. Понятие бианизотропии и ее виды.

3.11. Основные принципы и области применения численных методов решения задач электродинамики: метод моментов, метод конечных элементов, метод конечных разностей во временной области.

3.12. Распространение радиоволн вблизи поверхности Земли. Рассеяние и поглощение радиоволн в тропосфере. Тропосферный волновод. Распространение радиоволн в ионосфере. Дисперсия и поглощение радиоволн в ионосферной плазме. Ионосферная рефракция. Окна прозрачности атмосферы: связь с космическими объектами.

# **Рекомендованная литература для профиля 1.3.4. «Радиофизика»**

1. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория волн. 3-е изд. Ленанд, 2015.
2. Рабинович М.И., Трубецков Д.И. Основы теории колебаний и волн. М.: Наука, 1987.
3. Мандельштам Л.И. Лекции по теории колебаний. - М.: Наука, 2006. - 471 с.
4. Ярив А., Юх П. Оптические волны в кристаллах. М.: Мир, 1987.
5. Никольский В.В., Никольская Т.И. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Наука, 1989.
6. Ю.В. Пименов, В.И. Вольман, А.Д. Муравцов.Техническая электродинамика. М.: Радио и связь, 2002. - 536 с.
7. Григорьев А.Д. Электродинамика и микроволновая техника. Изд-во «Лань», 2007.
8. Устройства генерирования и формирования радиосигналов / Под ред. Г.М. Уткина, В.Н. Кулешова, М.В. Благовещенского. - М.: Радио и связь, 1994.
9. Карлов Н.В. Лекции по квантовой электронике Учеб. пособие для физ. спец. вузов. - М.: Наука, 1983

**Дополнительная литература:**

1. Уфимцев П. Я. Теория дифракционных краевых волн в электродинамике. Введение в физическую теорию дифракции. Издание второе, М.: БИНОМ, Лаборатория знаний, 2012
2. Хёнл X, Мауэ А, Вестпфаль К Теория дифракции (М.: Мир, 1964)
3. Андронов А.А, Витт А.А., Хайкин С.Э. Теория колебаний. М.: Наука, 1981.
4. Вайнштейн Л А Электромагнитные волны 2-е изд. (М.: Радио и связь, 1988)
5. Ваганов Р.Б., Каценеленбаум Б.З. Основы теории дифракции (М.: Наука, 1982)
6. Мигулин В.В., Медведев В.И., Мустель Е.Р., Парыгин В.Н. Основы теории колебаний. М.: Наука, 1988.
7. Симовский К.Р. Слабая пространственная дисперсия в композиционных средах. СПб.: Политехника. 2003
8. Боголюбов Н.Н., Митропольский Ю.А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. М.: Наука, 1974.
9. Гауер Дж. Оптические системы связи. М.: Радио и связь, 1989.
10. Качмарек Ф. Введение в физику лазеров. М.: Мир, 1981.
11. Вайнштейн Л.А., Солнцев В.А. Лекции по сверхвысокочастотной электронике. М.: Сов. радио, 1973.
12. Theory and Phenomena of Metamaterials. Metamaterials Handbook. Filippo Capolino CRC Press, 2009
13. Superdirective dielectric nanoantennaю. Alexandr Krasnok, Constantin Simovski, Pavel Belov, and Yuri S. Kivshar. Nanoscale, vol. 6, pp. 7354-7361, 2014
14. Зверев В.А. Радиооптика. М.: Сов. радио, 1975.
15. Фейнберг Е. Л. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности. М.: Наука, 1999.
16. Боровиков В.А., Кинбер Б.Е. Геометрическая теория дифракции. М.: Связь, 1978

# **Specialization 1.3.4. Radio physics**

**1. Linear and nonlinear oscillatory systems**

1.1. Dynamical systems. Concepts of state, motion and oscillation. Number of degrees of freedom and order of dynamical systems. Phase space and phase trajectories as a way of describing oscillatory processes. Methods for determining phase trajectories. Isoclines and integral curves. Elements of a phase portrait. Singular point types: center, focus, node, saddle.

1.2. Free oscillations in linear systems with one degree of freedom. Harmonic oscillator equation and its solution. Losses in linear oscillatory systems. Free oscillations in a system of two coupled oscillators. Harmonic force applied to a system of two coupled oscillators.

1.3. Oscillations in ordered structures. Chains of coupled oscillators. Taking the limit of ordered structures (one-dimensional continuous medium as a limit of an ordered structure). Temporal and spatial dispersion.

1.4. Forced oscillations in linear systems and systems with a small nonlinearity. Examples of solving a harmonic oscillator equation with a given external force. Forced action and parametric action.

1.5. Self-oscillation systems and methods for their analysis. Examples of self-oscillation systems with one or two degrees of freedom. Energy relation in self-oscillation systems.

1.6. Parametric systems. Amplification and generation of oscillations in parametric systems. Manley–Rowe equations. Frequency conversion in periodic systems.

1.7. Stability of oscillating systems. Stability definition according to Lyapunov. Methods for studying the stability of stationary modes in dynamic systems. Chaotic oscillating systems. Strange attractor. Features of the phase portrait of a chaotic dynamic system.

1.8. Free and forced oscillations in systems with distributed parameters. Examples of systems with distributed parameters. Wave equation. Phase velocity. Dispersion in a system with distributed parameters. The method of eigenmodes decomposition for analysis of the effect of external force on distributed systems.

1.9. Self-oscillation systems based on systems with distributed parameters. Conditions of self-excitation. Single-mode and multi-mode generation modes.

**2. Generation and conversion of signals**

2.1. Quantum standards of time and frequency in the radio-frequency and optical ranges. Examples and principles of operation.

2.2. Signal transmission in waveguide structures. Waveguides, transmission lines, optical fibers. The cutoff frequency of a waveguide. Waveguide modes.

2.3. Waves in metal waveguides. Waves of TE, TM, and TEM types. Group and phase velocities. Cavity resonators.

2.4. Interaction of a stream of charged particles with microwave electromagnetic field. Bunching of charge carriers. Principles of energy transfer and selection during the interaction of a stream of charged particles with a resonator field. Principles of amplification of microwave signals in vacuum electronic devices.

2.5. The principles of operation of vacuum electronic devices designed for power amplification and generation: traveling-wave tube, floating-drift-tube klystron, backward-wave tube, magnetron, reflex klystron.

2.6. Semiconductor microwave generators: generators with a field-effect transistor, with a tunnel diode, with a Gunn diode. Gunn diode-based amplifier.

2.7. Nuclear magnetic resonance and its applications. Interaction of nuclear spins with a radio frequency magnetic field. Principles of magnetic resonance imaging.

2.8. Principles of light control. Spatial modulation of the refractive index with an acoustic wave. Acousto-optic devices: modulators, deflectors, filters. Light control using electro-optic and magneto-optic effects.

**3. Radiation, propagation, and reception of electromagnetic waves**

3.1. Electromagnetic field equations. Boundary conditions. Material properties of isotropic and anisotropic media. Maxwell's equations in the harmonic regime. Lorentz lemma. Reciprocity principle.

3.2. Electrodynamic potentials and Hertz vectors. Green’s function method. Elementary field sources: Hertzian dipole, magnetic dipole, Huygens source.

3.3. Electromagnetic wave radiation from a Hertzian electric dipole. The concepts of near-field, intermediate-field and far-field regions (radiation zones). Radiation pattern. Directivity, and power gain. Types of antennas in the radio-frequency range. Optical nanoantennas.

3.4. Periodic structures. Active phased arrays (active electronically scanned arrays). Principles of obtaining directional radiation and control over the main maximum of a radiation pattern. Reflective and transmissive arrays.

3.5. Diffraction of electromagnetic waves on periodic structures: reflective and transmissive diffraction gratings. Electromagnetic metamaterials and metasurfaces.

3.6. The phenomenon of diffraction of electromagnetic waves. Diffraction of a plane wave by an infinite metallic cylinder. Diffraction of a plane wave by a metal sphere. Rigorous solution with analytical method of variables separation. The concept of effective radar cross-section.

3.7. Asymptotic methods for calculating the radiation field: physical optics method. Geometrical optics method. Examples of application for the calculation of wave fronts.

3.8. Radiation from a rectangular aperture in a metal screen. Kirchhoff approximation. Operation principles and parameters of reflector and lens antennas in the radio frequency range.

3.9. Black-body radiation. Stefan-Boltzmann law. Wien's law. Planck’s formula. Types of noise in the radio-frequency range.

3.10. Propagation of electromagnetic waves in anisotropic media. Waves in cold plasma. Waves in a magnetized ferrite. The Faraday effect. The concept of bianisotropy and its types.

3.11. Main principles of numerical methods for solving electrodynamic problems and their fields of application: the method of moments, the finite element method, the finite-difference time-domain method.

3.12. The propagation of radio waves near the surface of the Earth. Scattering and absorption of radio waves in the troposphere. The tropospheric waveguide. Propagation of radio waves in the ionosphere. Dispersion and absorption of radio waves in ionospheric plasma. Ionospheric refraction. Atmospheric transparency windows: communication with space objects.

# **Recommended literature for specialization 1.3.4. Radio physics**

1. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория волн. 3-е изд. Ленанд, 2015.
2. Рабинович М.И., Трубецков Д.И. Основы теории колебаний и волн. М.: Наука, 1987.
3. Мандельштам Л.И. Лекции по теории колебаний. - М.: Наука, 2006. - 471 с.
4. Ярив А., Юх П. Оптические волны в кристаллах. М.: Мир, 1987.
5. Никольский В.В., Никольская Т.И. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Наука, 1989.
6. Ю.В. Пименов, В.И. Вольман, А.Д. Муравцов.Техническая электродинамика. М.: Радио и связь, 2002. - 536 с.
7. Григорьев А.Д. Электродинамика и микроволновая техника. Изд-во «Лань», 2007.
8. Устройства генерирования и формирования радиосигналов / Под ред. Г.М. Уткина, В.Н. Кулешова, М.В. Благовещенского. - М.: Радио и связь, 1994.
9. Карлов Н.В. Лекции по квантовой электронике Учеб. пособие для физ. спец. вузов. - М.: Наука, 1983

**Further reading:**

1. Уфимцев П. Я. Теория дифракционных краевых волн в электродинамике. Введение в физическую теорию дифракции. Издание второе, М.: БИНОМ, Лаборатория знаний, 2012
2. Хёнл X, Мауэ А, Вестпфаль К Теория дифракции (М.: Мир, 1964)
3. Андронов А.А, Витт А.А., Хайкин С.Э. Теория колебаний. М.: Наука, 1981.
4. Вайнштейн Л А Электромагнитные волны 2-е изд. (М.: Радио и связь, 1988)
5. Ваганов Р.Б., Каценеленбаум Б.З. Основы теории дифракции (М.: Наука, 1982)
6. Мигулин В.В., Медведев В.И., Мустель Е.Р., Парыгин В.Н. Основы теории колебаний. М.: Наука, 1988.
7. Симовский К.Р. Слабая пространственная дисперсия в композиционных средах. СПб.: Политехника. 2003
8. Боголюбов Н.Н., Митропольский Ю.А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. М.: Наука, 1974.
9. Гауер Дж. Оптические системы связи. М.: Радио и связь, 1989.
10. Качмарек Ф. Введение в физику лазеров. М.: Мир, 1981.
11. Вайнштейн Л.А., Солнцев В.А. Лекции по сверхвысокочастотной электронике. М.: Сов. радио, 1973.
12. Theory and Phenomena of Metamaterials. Metamaterials Handbook. Filippo Capolino CRC Press, 2009
13. Superdirective dielectric nanoantennaю. Alexandr Krasnok, Constantin Simovski, Pavel Belov, and Yuri S. Kivshar. Nanoscale, vol. 6, pp. 7354-7361, 2014
14. Зверев В.А. Радиооптика. М.: Сов. радио, 1975.
15. Фейнберг Е. Л. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности. М.: Наука, 1999.
16. Боровиков В.А., Кинбер Б.Е. Геометрическая теория дифракции. М.: Связь, 1978

**Научная специальность 1.3.6. «Оптика»**

1. Уравнения Максвелла в пустом пространстве и в веществе. Заряды и токи. Материальные уравнения. Неоднородные и однородные волновые уравнения.
2. Баланс энергии поля. Вектор Пойтинга.
3. Волновое уравнение. Плоские и сферические волны. Фазовая и групповая скорости света.
4. Поляризация света. Параметры Стокса. Сфера Пуанкаре. Типы поляризационных устройств.
5. Отражение и преломление света на границе раздела изотропных сред. Формулы Френеля. Полное внутреннее отражение.
6. Комплексная диэлектрическая проницаемость. Отражение света от поверхности проводника. Глубина проникновения.
7. Распространение света в анизотропных и гиротропных средах. Волновые поверхности в кристаллах. Лучи и волновые нормали. Эллипсоид Френеля. Оптические свойства одноосных и двуосных кристаллов. Двойное лучепреломление.
8. Электрооптические эффекты Керра и Поккельса. Оптическая активность. Эффект Фарадея.
9. Геометрическая оптика. Геометрооптическое приближение. Уравнение эйконала. Область применения лучевого приближения. Принцип Ферма.
10. Понятие оптического изображения. Параксиальное приближение. Преломление на сферической поверхности. Сферические зеркала и линзы. Образование каустик в оптических системах.
11. Интерференция частично когерентного излучения. Комплексная степень когерентности.
12. Двулучевая и многолучевая интерференция. Многослойные покрытия.
13. Дифракция Френеля и Фраунгофера.
14. Влияние дифракции на разрешающую силу систем, образующих изображение. Дифракционная решетка.
15. Классическая теория взаимодействия излучения с веществом. Резонансное приближение. Нормальная и Аномальная дисперсии. Соотношения Крамерса-Кронига.
16. Законы теплового излучения. Формула Планка.
17. Квантование поля. Операторы рождения и уничтожения фотонов. Гамильтониан квантованного поля. Коммутационные соотношения для операторов поля.
18. Однофотонные и многофотонные процессы. Вероятности спонтанных и вынужденных переходов. Коэффициенты Эйнштейна. Квадрупольные и магнито-дипольные переходы.
19. Кооперативные эффекты. Сверхизлучение.
20. Комбинационное рассеяние света.
21. Нелинейные восприимчивости. Распространение волн в нелинейной среде. Метод медленно меняющихся амплитуд. Условие синхронизма.
22. Генерация оптических гармоник. Трехволновое взаимодействие. Параметрическое преобразование частоты. Самофокусировка света.
23. Временная и пространственная когерентность световых полей; корреляционные функции первого и высших порядков. Спектральное представление.
24. Оптически индуцированные электронные переходы в идеальных полупроводниках. Длинноволновый край поглощения. Взаимодействие света с фононной подсистемой.
25. Запрещенная зона и область прозрачности в диэлектрических кристаллах. Экситоны Ванье-Мотта и Френкеля. Область фундаментального поглощения.
26. Люминесценция. Классификация люминесценции по длительности свечения и способу ее возбуждения. Закон Стокса-Ломмеля.

**Рекомендованная литература для профиля 1.3.6 «Оптика»**

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970.
2. Королев Ф.А. Теоретическая оптика. М.: Высшая школа, 1966.
3. Матвеев А.Н. Оптика. М.: Высшая школа, 1985.
4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Оптика. М.: Наука, 1980.
5. Шерклиф У. Поляризованный свет. М.: Мир, 1965.
6. Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е., Чиркин А.С. Введение в статистическую радиофизику и опти-ку. М.: Наука, 1981.
7. Гудмен Дж. Статистическая оптика. М.: Мир, 1988.
8. Мандель Л., Вольф Э. Оптическая когерентность и квантовая оптика. М.: Физматлит, 2000.
9. Солимено С., Крозиньяни Б., Порто П. Дифракция и волноводное распространение оптиче-ского излучения. М.: Мир, 1989.
10. Пантел Р., Путхоф Г. Основы квантовой электроники. М.: Мир, 1972.
11. Клышко Д.Н. Физические основы квантовой электроники. М.: Наука, 1986
12. Шен И.Р. Принципы нелинейной оптики. М.: Наука, 1989.
13. Ельяшевич М.А. Атомная и молекулярная спектроскопия. М.: Физматгиз, 1962.
14. Собельман И.И. Введение в теорию атомных спектров. М.: Физматгиз, 1963.
15. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 1978.
16. Васильев А.Н., Михайлин В.В. Введение в спектроскопию твердого тела. М.: Изд-во МГУ, 1987.
17. Левшин Л.В., Салецкий А.М. Люминесценция и ее измерения. (молекулярная люминесцен-ция). М.: Изд-во МГУ, 1989.
18. Гурвич А.М. Введение в физическую химию кристаллофосфоров. М.: Высшая школа, 1971.
19. Лебедева В.В. Экспериментальная оптика. М.: Изд-во МГУ, 1994.
20. Левшин Л.В., Салецкий А.М. Оптические методы исследования молекулярных систем. Ч.1: Молекулярная спектроскопия. М.: Изд-во МГУ, 1994.
21. Тернов И.М., Михайлин В.В. Синхротронное излучение. Теория и эксперимент. М.: Энерго-атомиздат, 1986.
22. Гудмен Дж. Введение в фурье-оптику. М.: Мир, 1970.
23. Ярив А. Введение в оптическую электронику. М.: Высшая школа, 1983.
24. Карлов Н.В. Лекции по квантовой электронике. М., Наука, 1988.
25. Корниенко Л.С., Наний О.Е. Физика лазеров. Ч.1, 2. М.: Изд-во МГУ, 1996.
26. Мэйтленд А., Данн М. Введение в физику лазеров. М.: Наука, 1978.
27. Ханин Я.И. Основы динамики лазеров. М., 1999.
28. Ахманов С.А., Выслоух В.А., Чиркин А.С. Оптика фемтосекундных лазерных импульсов. М.: Наука, 1990.
29. Парыгин В.Н., Балакший В.И. Оптическая обработка информации. М.: Издательство МГУ, 1987.
30. Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И. Принципы адаптивной оптики. М.: Наука, 1985.
31. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Т. 1,2. M.: Мир, 1981.

# **Specialization 1.3.6. Optics**

1. Maxwell's equations in free space and in a medium. Charge and currents. Constitutive equations. Inhomogeneous and homogeneous wave equations.
2. Electromagnetic energy balance. Poynting vector.
3. Wave equation. Plane and spherical waves. Phase velocity and group velocity of light.
4. Polarization of light. Stokes parameters. *Poincaré* sphere. Polarizer types.
5. Reflection and refraction of light at the interface between isotropic media. Fresnel equations. Total internal reflection.
6. Complex permittivity. Reflection of light from a conductor surface. Penetration depth.
7. Propagation of light in anisotropic and gyrotropic media. Wave surfaces in crystals. Beams and wave normals. Fresnel ellipsoid. Optical properties of uniaxial and biaxial crystals. Birefringence.
8. Electro-optic Kerr and Pockels effects. Optical activity. Faraday effect.
9. Geometrical optics. The approximation of geometric optics. Eikonal equation. Field of application of ray approximation. Fermat's principle.
10. Concept of optical image. Paraxial approximation. Refraction at spherical surfaces. Spherical mirrors and lenses. Formation of caustics  in optical systems.
11. Interference of partially coherent radiation. Normalized degree of coherence (complex degree of coherence).
12. Two-beam and multiple-beam interference. Multiple coating layers.
13. Fresnel and Fraunhofer diffraction.
14. Effect of diffraction on the resolving power of imaging systems. Diffraction grating.
15. Classical theory of material-radiation interaction. Resonance approximation. Normal and anomalous dispersion. The Kramers–Kronig relations.
16. Laws of thermal radiation. Planck’s formula.
17. Quantization of fields. *Photon creation and annihilation operators*. Hamiltonian of a quantized field. Commutation relations for field operators.
18. Single-photon and multiphoton processes. Probabilities of spontaneous and stimulated transitions. Einstein coefficients. Quadrupole and magnetic-dipole transitions.
19. Cooperative effects. Superradiance.
20. Raman scattering.
21. Nonlinear susceptibilities. Wave propagation in nonlinear media. Slowly varying amplitude approximation. Phase matching condition.
22. Optical harmonic generation. Three-wave interaction. Parametric frequency conversion. Self-focusing.
23. Temporal and spatial coherence of light fields; first-order and higher-order correlation functions. Spectral representation.
24. Optically induced electronic transitions in perfect semiconductors. Long-wavelength absorption edge (long-wavelength threshold of photoeffect). Interaction of light with phonon subsystems.
25. Band gap and transparency region in dielectric crystals. Frenkel exciton and Wannier-Mott exciton. Band gap absorption region.
26. Luminescence. Classification of luminescence by lifetime and type of excitation. Stokes-Lommel law (Stokes shift).

# **Recommended literature for specialization 1.3.6. Optics**

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970.
2. Королев Ф.А. Теоретическая оптика. М.: Высшая школа, 1966.
3. Матвеев А.Н. Оптика. М.: Высшая школа, 1985.
4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Оптика. М.: Наука, 1980.
5. Шерклиф У. Поляризованный свет. М.: Мир, 1965.
6. Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е., Чиркин А.С. Введение в статистическую радиофизику и опти-ку. М.: Наука, 1981.
7. Гудмен Дж. Статистическая оптика. М.: Мир, 1988.
8. Мандель Л., Вольф Э. Оптическая когерентность и квантовая оптика. М.: Физматлит, 2000.
9. Солимено С., Крозиньяни Б., Порто П. Дифракция и волноводное распространение оптиче-ского излучения. М.: Мир, 1989.
10. Пантел Р., Путхоф Г. Основы квантовой электроники. М.: Мир, 1972.
11. Клышко Д.Н. Физические основы квантовой электроники. М.: Наука, 1986
12. Шен И.Р. Принципы нелинейной оптики. М.: Наука, 1989.
13. Ельяшевич М.А. Атомная и молекулярная спектроскопия. М.: Физматгиз, 1962.
14. Собельман И.И. Введение в теорию атомных спектров. М.: Физматгиз, 1963.
15. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 1978.
16. Васильев А.Н., Михайлин В.В. Введение в спектроскопию твердого тела. М.: Изд-во МГУ, 1987.
17. Левшин Л.В., Салецкий А.М. Люминесценция и ее измерения. (молекулярная люминесцен-ция). М.: Изд-во МГУ, 1989.
18. Гурвич А.М. Введение в физическую химию кристаллофосфоров. М.: Высшая школа, 1971.
19. Лебедева В.В. Экспериментальная оптика. М.: Изд-во МГУ, 1994.
20. Левшин Л.В., Салецкий А.М. Оптические методы исследования молекулярных систем. Ч.1: Молекулярная спектроскопия. М.: Изд-во МГУ, 1994.
21. Тернов И.М., Михайлин В.В. Синхротронное излучение. Теория и эксперимент. М.: Энерго-атомиздат, 1986.
22. Гудмен Дж. Введение в фурье-оптику. М.: Мир, 1970.
23. Ярив А. Введение в оптическую электронику. М.: Высшая школа, 1983.
24. Карлов Н.В. Лекции по квантовой электронике. М., Наука, 1988.
25. Корниенко Л.С., Наний О.Е. Физика лазеров. Ч.1, 2. М.: Изд-во МГУ, 1996.
26. Мэйтленд А., Данн М. Введение в физику лазеров. М.: Наука, 1978.
27. Ханин Я.И. Основы динамики лазеров. М., 1999.
28. Ахманов С.А., Выслоух В.А., Чиркин А.С. Оптика фемтосекундных лазерных импульсов. М.: Наука, 1990.
29. Парыгин В.Н., Балакший В.И. Оптическая обработка информации. М.: Издательство МГУ, 1987.
30. Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И. Принципы адаптивной оптики. М.: Наука, 1985.
31. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Т. 1,2. M.: Мир, 1981.

**Научная специальность 1.3.8. «Физика конденсированного состояния»**

1. Кристаллические структуры. Симметрия кристаллов. Ячейка Вигнера-Зейтца.
2. Обратная решетка. Векторы обратной решетки и атомные плоскости. Обратное пространство и зона Бриллюэна.
3. Дифракция рентгеновских лучей. Картины Лауэ и Брэгга.
4. Граничные условия Борна — Кармана. Теорема Блоха.
5. Блоховские волны. Явления на границе зоны Бриллюэна.
6. Теплопроводность. Эффекты Видемана-Франца и Зеебека в теории Друде и в теории Зоммерфельда.
7. Ионная связь.
8. Ковалентная связь.
9. Закон Гука для изотропной сплошной среды и для кристалла.
10. Реальные кристаллы. Точечные дефекты, дислокации и включения. Их характеристики.
11. Дислокации и физико-механические свойства твердых тел.
12. Фазовые переходы в твердых телах.
13. Колебания трехмерных решеток. Акустические и оптические моды.
14. Квантование колебаний решетки. Фононы.
15. Теплоемкость решетки. Модели Эйнштейна и Дебая.
16. Методы расчета зонной структуры твердых тел в приближении слабой связи.
17. Диэлектрики, металлы и полупроводники (собственные и примесные).
18. Взаимодействие электронов с акустическими фононами. Деформационный потенциал.
19. Взаимодействие электронов с оптическими фононами.
20. Межзонное и внутризонное оптическое поглощение.
21. Экситоны в твердых телах (экситоны Ванье-Мотта и Френкеля, оптические свойства тел).
22. Виды комбинационного рассеяния света. Механизмы комбинационного рассеяния в твердых телах. Рамановская спектроскопия.
23. Коллективные возбуждения в конденсированных средах. Объемные и поверхностные плазмоны.
24. Законы отражения и преломления света. Явление полного внутреннего отражения.
25. Прохождение поляризованного света через границу диэлектрика. Формулы Френеля. Угол Брюстера.
26. Двойное лучепреломление.
27. Электрооптические эффекты (линейный и квадратичный).
28. Линейный магнитооптический эффект.
29. Размерное квантование. Структуры с квантовыми ямами, нитями и точками.
30. Магнетизм в твердых телах. Диа- и парамагнетизм. Ферромагнетизмы. Спиновые цепочки.

# **Specialization 1.3.8. Condensed matter physics**

1. Crystal structures. Symmetry of crystals. Wigner-Seitz cell.
2. Reciprocal lattice. Reciprocal lattice vectors and atomic planes. Reciprocal space and Brillouin zone.
3. X-ray diffraction. Laue and Bragg diffraction images.
4. Born—von Karman boundary conditions. Bloch's theorem.
5. Bloch waves. Phenomena at the Brillouin zone edge (at critical points).
6. Thermal conductivity. Wiedemann-Franz law and Seebeck effect in Drude model and Drude–Sommerfeld model.
7. Ionic bonding.
8. Covalent bond.
9. Hooke's law for isotropic continuum and crystals.
10. Imperfect crystals. Point defects, dislocations and inclusions. Their properties.
11. Dislocations and physical and mechanical properties of solids.
12. Phase transitions in solids.
13. Vibrations in three-dimensional lattices. Acoustic and optical modes.
14. Quantization of lattice vibrations. Phonons.
15. Lattice heat capacity. Einstein and Debye models.
16. Methods for calculating band structure of solids in weak-binding approximation.
17. Dielectrics, metals, and semiconductors (intrinsic and extrinsic ones).
18. Interaction of electrons with acoustic phonons. Deformation potential.
19. Interaction of electrons with optical phonons.
20. Interband and intraband optical absorption.
21. Excitons in solids (Frenkel exciton and Wannier-Mott exciton, optical properties of solids).
22. Types of Raman scattering. Mechanisms of Raman scattering in solids. Raman spectroscopy.
23. Collective excitations in condensed media. Volume and surface plasmons.
24. The laws of reflection and refraction of light. Total internal reflection.
25. Transmission of polarized light through the interface between dielectric media. Fresnel formulas. Brewster's angle.
26. Birefringence.
27. Electro-optical effects (linear and quadratic).
28. Linear magneto-optical effect.
29. Dimensional quantization (the quantum size effect). Structures with quantum wells, wires, and dots.
30. Magnetism in solids. Diamagnetism and paramagnetism. Ferromagnetism. Spin chains.

**Научная специальность 1.3.11. «Физика полупроводников»**

1. Электростатика. Метод изображений. Принцип суперпозиции. Электрическое поле диполя.

2. Уравнения Пуассона и Лапласа. Задача Дирихле. Задача Неймана. Задача Робена.

3. Потенциал электрического поля. Энергия электрического поля. Электрическая емкость проводников и конденсаторов. Объемная плотность энергии электрического поля.

4. Операторы физических величин. Теорема Гаусса. Теорема Ирншоу.

5. Вектор электрической поляризации. Вектор электрической индукции. Поляризуемость и диэлектрическая проницаемость.

6. Линейная, эллиптическая и круговая поляризация. Оптическая активность.

7. Законы термодинамики. Термодинамические потенциалы.

8. Основные принципы статистики. Статистика Ферми – Дирака. Статистика Максвелла – Больцмана. Статистика носителей заряда в полупроводниках.

9. Интерференция. Дифракция. Дифракционная решетка и ее разрешающая способность.

10. Зонная структура полупроводников. Плотность числа электронных состояний в зоне.

11. Распределение света в веществе. Показатель преломления. Формулы Френеля. Двойное лучепреломление.

12. Структура кристаллов. Химические связи в кристаллах. Ковалентные кристаллы. Ионные кристаллы.

13. Амплитуды вероятности и волновая функция. Уравнение Шредингера. Зона Бриллюэна.

14. Квантовая теория гармонического кристалла. Фононы. Законы дисперсии фононов

15. Элементы зонной теории кристаллов. Метод слабой и сильной связи. Псевдопотенциал.

16. Понятие о p – n переходе. Равновесный и неравновесный p – n-переход. Плавный и резкий p – n-переход. Барьерная емкость. Омический переход.

17. Электромагнитные волны. Система уравнений Максвелла в интегральной и дифференциальной форме. Ток смещения.

18. Собственные и примесные полупроводники. Уровень Ферми. Населенность примесных уровней при термодинамическом равновесии. Равновесная концентрация носителей в примесном полупроводнике.

19. Движение зарядов в электрическом и магнитном полях. Эффект Холла. Квантовый эффект Холла.

20. Кристаллические решетки. Симметрия. Ячейка Вигнера – Зейтца. Решетка Бравэ. Координационное число.

21. Упругость. Закон Гука в изотропном и анизотропном приближении. Тензор напряжений, тензор деформаций.

22. Заполнение зон: металлы, диэлектрики и полупроводники. Электропроводность полупроводников. Понятие о дырочной проводимости. Уравнения переноса.

23. Уровни электрона в периодическом потенциале. Теорема Блоха. Граничное условие Борна — Кармана.

24. Влияние поверхности на энергию связи электрона. Работа выхода. Контактная разность потенциалов.

25. Дефекты в кристаллах. Точечные дефекты. Линейные дефекты. Дефекты упаковки.

26. Дифракция рентгеновских лучей на кристалле. Эквивалентность формулировок Брэгга и Лауэ. Дифракция на монокристалле.

27. Лавинный, туннельный и тепловой пробой в p – n-переходе. Переходные процессы в p – n-переходе.

28. Дипольные моменты в прямозонных полупроводниках. Оптическая восприимчивость. Спонтанное излучение. Бимолекулярная рекомбинация.

29. Квантовая яма. Оптические межзонные и межподзонные переходы. Квантово-размерный эффект Штарка.

30. Удельная теплоемкость кристаллической решетки. Тепловое расширение кристаллов. Рассеяние на кристаллической решетке.

**Рекомендованная литература для профиля подготовки 1.3.11. «Физика полупроводников»**

1. Ашкрофт Н., Мермин Н. Физика твердого тела. Т. 1, 2 //М: Мир. – 1979.
2. Киттель Ч. Квантовая теория твёрдых тел. – Рипол Классик, 2013..
3. Бонч-Бруевич В. Л., Калашников С. Г. Физика полупроводников. – 1977.
4. Лангдсберг Г.С. Оптика. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.
5. Вонсовский С. В., Кацнельсон М. И. Квантовая физика твердого тела. – 1983.
6. Розеншер Э., Винтер Б. Оптоэлектроника. – Техносфера, 2006.
7. Пасынков В. В., Чиркин Л. К. Полупроводниковые приборы. – Лань, 2009.
8. Ансельм А. И. Введение в теорию полупроводников=. – Лань, 2008.
9. Зегря Г. Г., Перель В. И. Основы физики полупроводников. – М.: Физматлит. – 2009.
10. Сивухин С.П. Общий курс физики т.т.1-5. —М., Наука, 2000
11. Матвеев А.И., Молекулярная физика. –М., Высшая школа, 1981. – 400с.

# **Научная специальность 1.3.14. «Теплофизика и теоретическая теплотехника»**

1. Параметры состояния. Понятие о термодинамическом процессе.
2. Излучение абсолютно черного тела. Закон Кирхгофа. Законы Стефана-Больцмана и Вина.
3. Идеальный газ. Процессы идеального газа.
4. Теория подобия. Основные критерии подобия для расчета процессов конвективного теплообмена.
5. Второй закон термодинамики. Обратимые и необратимые процессы.
6. Методы определения коэффициента теплопроводности.
7. Энтропия. Изменения энтропии в необратимых процессах.
8. Теплоотдача при вынужденном движении жидкостей и газов в трубах и каналах.
9. Эффект Джоуля-Томсона. Адиабатное дросселирование.
10. Температурные шкалы. Термодинамическая шкала. Международная температурная шкала.
11. Фазовые переходы первого и второго рода. Условия равновесия фаз. Критическая точка.
12. Газовые и жидкостные термометры, их принцип действия и конструктивные особенности.
13. Реальные газы. Уравнение состояния. Изотермы Ван-дер-Ваальса.
14. Термоэлектрические методы и средства измерения температур.
15. Явления переноса: диффузия, вязкость и теплопроводность.
16. Свободноконвективный теплообмен тела в неограниченном пространстве.
17. Дифференциальное уравнение теплопроводности в твердом теле.
18. Термометры сопротивления. Материалы, устройства, характеристики и области применения.
19. Методы определения теплоемкости материалов.
20. Теплообмен излучением при наличии экрана.
21. Первый закон термодинамики. Энтальпия.
22. Теплоотдача при кипении.
23. Термоэлектрические преобразователи для измерения температуры..
24. Свободноконвективный теплообмен в замкнутых полостях.
25. Лучистый теплообмен между двумя параллельными поверхностями.
26. Способы получения низких температур.
27. Теплообмен при внешнем обтекании вынужденным потоком одиночных цилиндров и трубных пучков.
28. Теплоотдача при конденсации пара.
29. Оребрение как средство интенсификации теплопередачи.
30. Температурные зависимости теплофизических свойств веществ.

# **Рекомендованная литература для научной специальности 1.3.14. «Теплофизика и теоретическая теплотехника».**

1. Цыганков А.В., Долговская О.В., Моделирование процессов тепломассопереноса в регенеративных теплообменниках климатических систем – СПб: Университет ИТМО, 2021. – 69 с.
2. Сулин А.Б., Рябова Т.В., Никитин А.А., Моделирование теплоощущений в кондиционируемых помещениях – СПб: Университет ИТМО, 2019. – 33 с.
3. Пилипенко Н. В. Методы и приборы для исследования дисперсных систем. Учебное пособие – СПб: Университет ИТМО, 2018: - 34с.
4. Пронин В.А., Мамченко В.О., Долговская О.В., Цветков В.А. Очистка и дезодорация газовоздушных выбросов. – СПб: Университет ИТМО, 2022. – 156 с.
5. Карташов Э. М.; Кудинов В. А.; Калашников В. В. Теория Тепломассопереноса: Решение Задач Для Многослойных Конструкций 2-е изд., пер. и доп. Yurayt (https:\\biblio-online.ru\), 2022
6. Баранов А.Ю., Соколова Е.В. Хранение и транспортировка криогенных жидкостей. Часть 2: учебно-методическое пособие.– СПб: Университет ИТМО, 2018. – 60 с
7. Цветков, О. Б, Лаптев Ю.А., Баранцов А.А. Расчет свойств холодильных агентов: учебно-методическое пособие / СПб. : Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2018. https://e.lanbook.com/book/91375

# **Научная специальность 1.3.17. «Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества»**

**1. Строение вещества**

1.1. Основы квантовой теории многоэлектронных систем. Адиабатическое приближение Борна-Оппенгеймера. Свойства симметрии многоэлектронной волновой функции. Основное и возбужденное состояния атома гелия. Многоэлектронные атомы и периодическая система элементов. Операторы момента импульса. Уровни энергии. Основные принципы теории валентности.

1.2. Электронное строение молекул. Метод молекулярных орбиталей и его применение к двухатомным молекулам. Молекулярный ион водорода и молекула водорода. Молекулярные орбитали гомоядерных двухатомных молекул. Гетероядерные двухатомные молекулы. Правило пересечения потенциальных кривых. Понятие о методе самосогласованного поля. Гибридизация атомных волновых функций. Метод молекулярных орбиталей в приближении Хюккеля применительно к молекулам с сопряженными связями.

1.3. Электронное строение координационных соединений. Межмолекулярное взаимодействие. Теория кристаллического поля. Комплексы со слабой и сильной связью. Спин-орбитальное взаимодействие. Применение метода молекулярных орбиталей к координационным соединениям. Эффект Яна-Теллера. Силы Ван-дер-Ваальса. Донорно-акцепторные комплексы. Водородная связь.

1.4. Строение и свойства твердого тела. Природа сил взаимодействия в кристаллах. Колебания и волны в одномерной решетке. Колебания атомов трехмерной кристаллической решетки. Нормальные колебания. Электрон в периодической поле. Приближение слабо и сильно связанных электронов. Зоны Бриллюэна. Структура энергетических зон. Локализованные состояния электронов в кристалле.

1.5. Химическая радиоспектроскопия. Условия возникновения ЯМР и ЭПР. Времена релаксации и форма резонансной линии. Гамильтониан магнитных взаимодействий. Химический сдвиг и спин-спиновое взаимодействие в ЯМР. Сверхтонкая структура спектров ЭПР. Интерпретация тензоров сверхтонкого взаимодействия и g-тензор. Возможности методов магнитного резонанса для исследования скоростей молекулярных и химических процессов.

**2. Основы молекулярной фотоники**

2.1. Электронная структура молекул. Возбужденные состояния. Поглощение и испускание света. Спектры поглощения и люминесценции. Флуоресценция и фосфоресценция. Теория и методы расчета электронно-колебательных спектров многоатомных молекул. Приближения Франка-Кондона и Герцберга-Теллера. Потенциальные поверхности электронно-возбужденных состояний. Переходы между состояниями. Матричные элементы переходов. Релаксация. Взаимодействия в возбужденных состояниях, комплексы с переносом заряда, эксимеры и эксиплексы. Безызлучательные электронные переходы. Неадиабатическое взаимодействие. Перенос заряда. Перенос энергии электронного возбуждения. Индуктивно-резонансный механизм. Теория Ферстера-Декстера. Миграция возбуждения по донорам.

2.2. Законы фотохимии. Классификация фотохимических реакций. Фотодиссоциация. Фотоприсоединение. Фотозамещение и фотоперегруппировка. Фотохимические окислительно-восстановительные реакции. Фотохимическая кинетика.

2.3. Основные принципы конструирования избирательных супрамолекулярных систем. Фотоуправляемое комплексообразование. Фотоинициированные структурные и фазовые превращения. Кинетика тушения флуоресценции в мироэмульсиях. Методы оптической (в том числе нелинейной) спектроскопии: адсорбционные, флуоресцентные, поляризационные, комбинационного рассеяния. Место фотохимии в области развития современных технологий и средств техники.

**3. Динамика атомов и молекул**

3.1. Химическая термодинамика и равновесие. Равновесное распределение молекул идеального газа. Распределение Максвелла и распределение Больцмана. Распределение Бозе и Ферми. Статистика Гиббса. Термодинамические свойства идеальных газов. Флуктуации. Равновесие фаз. Слабые растворы. Химические равновесия. Поверхностные явления.

3.2. Элементарные атомно-молекулярные процессы. Упругие столкновения атомов. Полное и дифференциальное сечения рассеяния. Неупругие столкновения. Вероятности переходов, сечения и константы скорости прямых и обратных процессов. Поверхность потенциальной энергии для систем 3-х атомов. Метод переходного состояния. Неадиабатические процессы.

3.3. Мономолекулярные реакции. Механизм активации молекул. Сильные столкновения и ступенчатое возбуждение. Статическая модель мономолекулярных реакций.

3.4. Термический распад двухатомных молекул. Бимолекулярные реакции, идущие через образование промежуточного комплекса. Прямые бимолекулярные реакции: рикошетный механизм, механизм срыва, механизм прямого выбивания. Распределение энергии в биомолекулярных реакциях.

3.5. Обмен энергии при молекулярных столкновениях. Превращение поступательной, вращательной и колебательной энергий при столкновениях. Релаксация по поступательным, вращательным и колебательным степеням свободы. Кинетические уравнения для заселенностей уровней энергии (в том числе при наличии химических реакций).

3.6. Взаимодействие электронов с атомами и молекулами. Возбуждение атомов и молекул электронным ударом. Ионизация атомов и молекул электронным ударом. Фотоионизация. Рекомбинация электронов и атомов.

**4. Основы химической кинетики**

4.1. Механизм и скорость химической реакции. Закон действующих масс. Порядок реакции. Константа скорости. Закон Аррениуса. Кинетика сложных реакций. Обратимые, последовательные параллельные процессы. Прямая и обратная кинетическая задача. Метод квазистационарных концентраций. Лимитирующая стадия сложного химического процесса. Кинетика химических реакций в открытых системах. Стационарные режимы.

4.2. Химические реакции в жидкой фазе. Роль среды в элементарном акте химической реакции. Влияние диффузии на скорость реакции. Клеточный эффект. Влияние диэлектрической постоянной и ионной силы на скорости химических реакций в растворах. Солевой эффект. Влияние давления на скорость реакции. Объем активации. Соотношения «структура-реакционная способность». Уравнения Гаммета и Тафта. Влияние магнитного поля на скорость химической реакции.

4.3. Индуцированные и гомогенно-каталитические реакции. Сопряженные реакции. Фотохимические и радиационно-химические реакции. Механизм гомогенного катализа. Кинетика гомогенно-каталитических реакций. Кислотно-основной катализ. Зависимость скорости химической реакции от функции кислотности Гаммета. Ферментативный катализ. Уравнение Михаэлиса-Ментен. Катализ комплексами и ионами металлов переменной валентности. Автокатализ.

4.4. Гетерогенный катализ. Равновесие и кинетика адсорбции на однородных и неоднородных поверхностях. Изотерма адсорбции Лэнгмюра. Хемосорбция. Моно- и полимолекулярные слои адсорбатов на поверхности. Ингибирование и конкуренция реакций на поверхности. Механизмы гетерогенного катализа. Уравнения Лэнгмюра-Хиншельвуда и Ридила.

**5. Основы синергетики**

5.1. Проблема порядка и беспорядка в структуре материи. Динамика и информация. Проблема необратимости. Динамический хаос. Диссипативные динамические системы.

5.2. Параметр порядка в критических явлениях и фазовых переходах. Теория фазовых переходов 1-го и 2-го рода. Теория Ландау. Флуктуационная теория фазовых переходов. Гипотеза подобия. Скейлинговая теория критических показателей.

5.3. Неравновесные фазовые переходы. Вынужденный порядок в открытых физических системах. Принцип Пригожина-Гленсдорфа. Самоорганизация. Пространственные и временные диссипативные структуры. Генерация когерентного излучения в лазере как пример неравновесного перехода.

5.4. Пространственно-временные диссипативные структуры в химии. Реакция Белоусова-Жаботинского.

**6. Химическая физика горения и взрыва**

6.1. Теория процессов горения. Уравнения теплопроводности и диффузии в химически реагирующей среде. Теория и критерий теплового взрыва. Цепной взрыв. Пределы цепного взрыва. Воспламенение и зажигание. Зажигание накаленной стенкой. Зажигание искрой. Очаговое воспламенение и минимальная энергия зажигания.

6.2. Теория и закономерности стационарного горения газовой смеси. Нормальная скорость распространения пламени. Пределы распространения пламени, предельный диаметр и предельная концентрация компонентов смеси. Диффузионно-тепловая неустойчивость пламени. Представление о турбулентном горении. Холодные пламена. Горение неперемешанных газов.

6.3. Горение твердых и жидких веществ в окислительной атмосфере. Зажигание и горение частиц и капель горючего в окислительной среде. Горение летучих и нелетучих взрывчатых веществ, порохов, смесей горючего с окислителем. Физика нестационарного горения.

6.4. Горение жидких взрывчатых веществ. Горение пористых зарядов взрывчатых веществ и порохов. Фильтрационного горение. Условия перехода послойного горения на конвективный режим и во взрыв.

6.5. Ударные волны и детонация. Система уравнений газовой динамики для одномерных движений в координатах Лагранжа и Эйлера. Характеристики, инварианты Римана. Понятие простой волны. Ударные волны. Уравнения сохранения массы, импульса и энергии на фронте ударной волны. Уравнения состояния газа и конденсированных сред. Ударная адиабата, изоэнтропы, их взаимное расположение. Ударные волны в реагирующих и релаксирующих средах. Взаимодействие волн: распады разрывов, затухание ударных волн.

6.6. Современная теория детонации. Правило отбора скорости стационарной детонации. Структура детонационной волны. Устойчивость детонационных волн. Пределы детонации. Пределы возбуждения детонации. Принцип Харитона. Особенности механизма энерговыделения в гомогенных и гетерогенных конденсированных веществах. Методы измерения основных параметров детонации. Современные методы решения задач физики горения и взрыва.

# **Рекомендованная литература для научной специальности 1.3.17. «Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества»**

1. Дж.Маррсл, С. Кетти, Дж. Теддер. Теория валентности
2. Г.Герцберг. Спектры и строение простых свободных радикалов
3. Ф.А.Баум, Л.П.Орленко, К.П.Станюкович, В.П.Челышев, Б.И.Шехтер. Физика взрыва
4. Н.М.Эмануэль, Д.Г.Кнорре. Курс химической кинетики
5. Д.А.Франк-Каменецкий. Диффузия и теплопередача в химической кинетике.
6. Е.Т.Денисов, О.М.Саркисов, Г.И.Лихтенштейн. Химическая кинетика
7. А.Л.Бучаченко, Р.З. Сагдеев, К.М. Салихов. Магнитные и спиновые эффекты в химических реакциях
8. Г.Б.Манелис, Г.М.Назин, Ю.И.Рубцов,В.А.Струнин. Термическое разложение и горение взрывчатых веществ и порохов.
9. Я.Б.Зельдович, Г.И.Баренблатт, В.Б.Либрович,Г.М.Махвиладзе.Математическая теория горения и взрыва.
10. А.Ф.Беляев, В.К.Боболев и др. Переход горения конденсированных систем во взрыв.
11. Н.Н.Бахман, А.Ф.Беляев. Горение гетерогенных конденсированных систем.
12. Б.Н.Новожилов. Нестационарное горение твердых ракетных топлив
13. Я.Б.Зельдович, Ю.П.Райзер. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений.
14. Г.И.Канель, С.В.Разоренов, А.В.Уткин, В.Е.Фортов. Ударно-волновые явления в конденсированных средах.

# **Specialization 1.3.17. Chemical physics, combustion and explosion, physics of extreme states of matter**

**1. The structure of matter**

1.1. Fundamentals of quantum theory of many-electron systems. Born-Oppenheimer adiabatic approximation. Symmetry properties of the many-electron wave function. Ground and excited states of the helium atom. Multi-electron atoms and the periodic system of elements. Angular momentum operators. Energy levels. Basic principles of the theory of valency.

1.2. Electronic structure of molecules. Molecular orbital theory and diatomic molecules. Molecular hydrogen ion and hydrogen molecule. Molecular orbitals of homonuclear diatomic molecules. Heteronuclear diatomic molecules. Rule of intersection of potential curves. The concept of the Mean-field theory. Hybridization of atomic wave functions. Hückel molecular orbital theory.

1.3. Electronic structure of coordination compounds. Intermolecular interaction. Crystal field theory. Complexes with weak and strong coupling. Spin-orbit interaction. Molecular orbital theory for coordination compounds. Jahn-Teller effect. Van der Waals forces. Donor-acceptor complexes. Hydrogen bond.

1.4. The structure and properties of a solid body. The nature of interaction forces in crystals. Oscillations and waves in a one-dimensional lattice. Vibrations of atoms of a three-dimensional crystal lattice. Normal fluctuations. Electron in a periodic field. Approximation of weakly and strongly bound electrons. Brillouin zones. The structure of energy zones. Localized states of electrons in a crystal.

1.5. Chemical radiospectroscopy. Conditions for the occurrence of NMR and EPR. Relaxation times and the shape of the resonance line. Hamiltonian of magnetic interactions. Chemical shift and spin-spin interaction in NMR. Hyperfine structure of EPR spectra. Interpretation of hyperfine interaction tensors and g-tensor. Possibilities of application of magnetic resonance methods for studying the rates of molecular and chemical processes.

**2. Fundamentals of molecular photonics**

2.1. Electronic structure of molecules. Excited states. Absorption and emission of light. Absorption and luminescence spectra. Fluorescence and phosphorescence. Theory and methods for calculating the electronic-vibrational spectra of polyatomic molecules. Franck-Condon and Herzberg-Teller approximations. Potential surfaces of electronically excited states. Transitions between states. Matrix elements of transitions. Relaxation. Interactions in excited states, charge-transfer complexes, excimers and exciplexes. Radiative electronic transitions. Non-adiabatic interaction. Charge transfer. Energy transfer of electronic excitation. Inductive-resonant mechanism. Förster–Dexter theory theory. Migration of excitation by donors.

2.2. The laws of photochemistry. Classification of photochemical reactions. Photodissociation. Photoattachment. Photosubstitution and photorearrangement. Photochemical redox reactions. Photochemical kinetics.

2.3. Basic principles of designing selective supramolecular systems. Photocontrolled complexation. Photoinitiated structural and phase transformations. Fluorescence quenching kinetics in miroemulsions. Methods of optical (including nonlinear) spectroscopy: adsorption, fluorescence, polarization, Raman scattering. The place of photochemistry in the development of modern technologies and means of technology.

**3. Dynamics of atoms and molecules**

3.1. Chemical thermodynamics and equilibrium. Equilibrium distribution of ideal gas molecules. Maxwell and Boltzmann distribution. Bose and Fermi distribution. Gibbs measure. Thermodynamic properties of ideal gases. Fluctuations. Phase equilibrium. Weak solutions. Chemical equilibrium. Surface science.

3.2. Elementary atomic and molecular processes. Elastic collisions of atoms. Total and differential scattering cross sections. Inelastic collisions. Transition probabilities, cross sections and rate constants of direct and inverse processes. Potential energy surface for systems of 3 atoms. Transition state method. Non-adiabatic processes.

3.3. Monomolecular reactions. Molecule activation mechanism. Strong interaction and stepped excitation. Static model of monomolecular reactions.

3.4. Thermal decomposition of diatomic molecules. Bimolecular reactions proceeding through the formation of an intermediate. Direct bimolecular reactions: rebound mechanism, stall mechanism, direct knockout mechanism. Distribution of energy in biomolecular reactions.

3.5. Energy exchange in molecular collisions. Transformation of translational, rotational and vibrational energies in collisions. Relaxation in translational, rotational and vibrational degrees of freedom. Kinetic equations for populations of energy levels (including those in the presence of chemical reactions).

3.6. Interaction of electrons with atoms and molecules. Excitation of atoms and molecules by electron impact. Ionization of atoms and molecules by electron impact. Photoionization. Recombination of electrons and atoms.

**4. Fundamentals of chemical kinetics**

4.1. The mechanism and rate of a chemical reaction. Law of mass action. The order of the reaction. Speed constant. Arrhenius equation. Kinetics of combination reactions. Reversible, step by step and parallel processes. Direct and inverse kinetic problem. Method of quasi-stationary concentrations. The limiting stage of a complex chemical process. Kinetics of chemical reactions in open systems. Stationary modes.

4.2. Chemical reactions in the liquid phase. The role of the environment in the elementary act of a chemical reaction. Influence of diffusion on the reaction rate. Cellular effect. Influence of the dielectric constant and ionic strength on the rates of chemical reactions in solutions. Salt effect. Effect of pressure on the reaction rate. Volume of activation. Structure-reactivity relationships. Equations of Hammett and Taft. Influence of a magnetic field on the rate of a chemical reaction.

4.3. Induced and homogeneous catalytic reactions. Conjugate reactions. Photochemical and radiation-chemical reactions. The mechanism of homogeneous catalysis. Kinetics of homogeneous catalytic reactions. Acid-base catalysis. Dependence of the chemical reaction rate on the Hammett acidity function. Enzymatic catalysis. Michaelis-Menten equation. Catalysis by complexes and metal ions of variable valence. Autocatalysis.

4.4. Heterogeneous catalysis. Equilibrium and kinetics of adsorption on homogeneous and inhomogeneous surfaces. Langmuir adsorption isotherm. Chemisorption. Mono- and polymolecular layers of adsorbates on the surface. Inhibition and competition of reactions on the surface. Mechanisms of heterogeneous catalysis. Equations of Langmuir–Hinshelwood and Riddle.

**5. Fundamentals of synergetics**

5.1. The problem of order and disorder in the structure of matter. Dynamics and information. The problem of irreversibility. Dynamic chaos. Dissipative dynamic systems.

5.2. Order parameter in critical phenomena and phase transitions. Theory of phase transitions of the 1st and 2nd type. Landau theory. Fluctuation theory of phase transitions. Similarity hypothesis. Scaling theory of critical exponents.

5.3. Non-equilibrium phase transitions. Forced order in open physical systems. Prigogine-Glensdorf principle. Self-organization. Spatial and temporal dissipative structures. Generation of coherent radiation in a laser as an example of a nonequilibrium transition.

5.4. Spatio-temporal dissipative structures in chemistry. Belousov-Zhabotinsky reaction.

**6. Chemical physics of combustion and explosion**

6.1. Theory of combustion processes. Heat conduction and diffusion equations in a chemically reacting medium. Theory and criterion of thermal explosion. Chain explosion. Limits of chain explosion. Inflammation and ignition. Ignition by a heated wall. Spark ignition. Focal ignition and minimum ignition energy.

6.2. Theory and regularities of stationary combustion of a gas mixture. Normal flame propagation speed. Flame propagation limits, limiting diameter and limiting concentration of mixture components. Diffusion-thermal instability of the flame. The concept of turbulent combustion. Cold flames. Combustion of unmixed gases.

6.3. Combustion of solid and liquid substances in an oxidizing atmosphere. Ignition and combustion of particles and drops of fuel in an oxidizing environment. Combustion of volatile and non-volatile explosives, gunpowder, mixtures of fuel with an oxidizing agent. Physics of unsteady combustion.

6.4. Burning liquid explosives. Combustion of porous charges of explosives and gunpowders. Filtration combustion. Conditions for the transition of layer-by-layer combustion to the convective regime and to the explosion.

6.5. Shock waves and detonation. System of equations of gas dynamics for one-dimensional motions in Lagrange and Euler coordinates. Characteristics, Riemann invariants. The concept of a simple wave. Shock waves. Equations for the conservation of mass, momentum, and energy at the front of a shock wave. Equations of state of gas and condensed media. Shock adiabat, isentropes, their mutual arrangement. Shock waves in reacting and relaxing media. Interaction of waves: disintegration of discontinuities, attenuation of shock waves.

6.6. Modern theory of detonation. Selection rule for the stationary detonation velocity. Structure of a detonation wave. Stability of detonation waves. Detonation limits. Limits of detonation excitation. Khariton principle. Features of the mechanism of energy release in homogeneous and heterogeneous condensed matter. Methods for measuring the main parameters of detonation. Modern methods for solving problems in the physics of combustion and explosion.

**Recommended literature for specialization 1.3.17. Chemical physics, combustion and explosion, physics of extreme states of matter**

1. Дж.Маррсл, С. Кетти, Дж. Теддер. Теория валентности
2. Г.Герцберг. Спектры и строение простых свободных радикалов
3. Ф.А.Баум, Л.П.Орленко, К.П.Станюкович, В.П.Челышев, Б.И.Шехтер. Физика взрыва
4. Н.М.Эмануэль, Д.Г.Кнорре. Курс химической кинетики
5. Д.А.Франк-Каменецкий. Диффузия и теплопередача в химической кинетике.
6. Е.Т.Денисов, О.М.Саркисов, Г.И.Лихтенштейн. Химическая кинетика
7. А.Л.Бучаченко, Р.З. Сагдеев, К.М. Салихов. Магнитные и спиновые эффекты в химических реакциях
8. Г.Б.Манелис, Г.М.Назин, Ю.И.Рубцов,В.А.Струнин. Термическое разложение и горение взрывчатых веществ и порохов.
9. Я.Б.Зельдович, Г.И.Баренблатт, В.Б.Либрович,Г.М.Махвиладзе.Математическая теория горения и взрыва.
10. А.Ф.Беляев, В.К.Боболев и др. Переход горения конденсированных систем во взрыв.
11. Н.Н.Бахман, А.Ф.Беляев. Горение гетерогенных конденсированных систем.
12. Б.Н.Новожилов. Нестационарное горение твердых ракетных топлив
13. Я.Б.Зельдович, Ю.П.Райзер. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений.
14. Г.И.Канель, С.В.Разоренов, А.В.Уткин, В.Е.Фортов. Ударно-волновые явления в конденсированных средах.

**Научная специальность 1.3.19. «Лазерная физика»**

* + - 1. Принципы работы лазера. Основные свойства лазерного излучения. Энергетические уровни атомов, молекул, кристаллов. Индуцированные и спонтанные переходы, коэффициенты Эйнштейна. Вероятности переходов, золотое правило Ферми. Однородное и неоднородное уширения линии излучения. Пространственная когерентность лазерного излучения. Временная когерентность лазерного излучения. Инверсия населенностей в лазере. Методы создания и назначение. Эффект насыщения. Трех- и четырехуровневые схемы генерации лазеров. Активные среды твердотельных лазеров. Полупроводниковые лазеры: классификация, принципы работы, особенности.
			2. Оптика лазерных резонаторов. Пассивные и активные резонаторы. Устойчивые и неустойчивые резонаторы. Поляризация света. Матрицы Джонса. Вектора поляризации мод резонатора. Методы селекции мод резонаторов. Селекция продольных, поперечных, поляризационных мод в резонаторе: принципы и методы экспериментальной реализации. Подавление двунаправленной генерации в кольцевом резонаторе. Взаимные и невзаимные оптические элементы.
			3. Динамика генерации лазеров. Линейный и нелинейный этапы генерации. Фазовый портрет лазера. Полуклассическая модель взаимодействия излучения с веществом. Уравнения Максвелла-Блоха и модель Лоренца-Хакена. Динамические классы лазеров.
			4. Режимы генерации лазеров. Методы реализации модуляции добротности: насыщающийся поглотитель, вращающееся зеркало, электрооптический модулятор, акустооптический модулятор, ОВФ-зеркало. Синхронизация мод: гребенки оптических частот, модель Хауса. Методы синхронизации мод: насыщающийся поглотитель, электрооптический модулятор, акустооптический модулятор, эффект Керра. Ультракороткие лазерные импульсы: генерация, усиление, диагностика.
			5. Термооптика твердотельных лазеров. Основные тепловые эффекты в лазерах: тепловая линза, деполяризация, механическое разрушение. Критерии оценки качества пучка. Термически-индуцированное двулучепреломление. Методы подавления и компенсации тепловых эффектов.
			6. Преобразование частоты лазерного излучения. Генерация гармоник лазерного излучения. Параметрические генераторы света. Вынужденное комбинационное рассеяние. Рамановские лазеры.
			7. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. Линейные режимы лазерного нагрева материалов, оценки температуры в области лазерного воздействия для типичных режимов. Механизмы разрушения

материалов под действием лазерного излучения (краткая характеристика основных механизмов разрушения).

* + - 1. Взаимодействие лазерного излучения с биотканями. Коагуляция, карбонизация и абляция биотканей. Механизмы и модели лазерной абляции биотканей. Лазеры для хирургии мягких и твердых биотканей. Законы, описывающие распространение света в биотканях. Основные оптические характеристики биотканей. Спектры пропускания, поглощения и рассеяния биотканей. Лазеры для диагностики и низкоинтенсивной терапии.
			2. Методы и схемы лазерной спектроскопии. Классификация линейных методов. Абсорбционная спектроскопия. Спектроскопия возбуждения. Оптоакустическая спектроскопия. Спектроскопия лазерного магнитного резонанса. Штарковская спектроскопия. Закон Бугера. Связь поглощения и дисперсии, соотношения Крамерса-Кронига.
			3. Нелинейная лазерная спектроскопия. Спектроскопия насыщения, стабилизация частоты генерации лазеров. Лазерная внутридоплеровская спектроскопия. Поляризационная спектроскопия. Спектроскопия гетеродинирования. Спектроскопия с временным разрешением. Принципы многофотонной спектроскопии. Лазерная спектроскопия комбинационного рассеяния. Спектроскопия комбинационного антистоксова рассеяния.
			4. Кооперативные эффекты в оптике. Самоиндуцированная прозрачность. Одномодовая модель сверхизлучения. Сверхизлучение систем с размерами меньше длины волны излучения. Сверзизлучение протяженных систем. Сверхизлучение при комбинационном рассеянии света.

1. Principles of laser operation. Basic properties of laser radiation. Energy levels of atoms, molecules, crystals. Induced and spontaneous transitions, Einstein coefficients. Transition probabilities, Fermi's Golden rule.

2. Homogeneous and inhomogeneous broadening of the emission line. Spatial coherence of laser radiation. Temporal coherence of laser radiation.

3. Population inversion in a laser: methods of achieving and the need to achieve. Saturation effect. Three- and four-level laser generation schemes.

4.Solid-state lasers: classification, principles of operation, characteristics.

5. Semiconductor lasers: classification, principles of operation, characteristics.

6. Gas lasers and dye lasers: classification, principles of operation, characteristics.

7. Optics of laser resonators. Passive and active resonators. Stable and unstable resonators. Polarization of light. Jones matrices.

8. Polarization vectors of resonator modes. Methods for selecting resonator modes. Selection of longitudinal, transverse polarization modes in a resonator: principles and methods of experimental implementation.

9. Suppression of bidirectional lasing in a ring resonator. Reciprocal and non-reciprocal optical elements.

10. Dynamics of laser generation. Linear and nonlinear stages of laser generation. Phase portrait of a laser. Semiclassical model of the interaction of laser field with matter.

11. Maxwell-Bloch equations and Lorentz-Haken model. Dynamical classification of lasers.

12. Laser generation modes. Methods for implementing Q-switching: saturable absorber, rotating mirror, electro-optical modulator, acousto-optical modulator, phase conjugation mirror.

13. Mode locking: optical frequency combs, Haus model. Mode locking methods: saturable absorber, electro-optical modulator, acousto-optical modulator, Kerr effect.

14. Ultrashort laser pulses: generation, amplification, examination.

15. Thermooptics of solid-state lasers. The key thermal effects in lasers: thermal lensing, depolarization, mechanical damage. Criteria for assessing beam quality.

16. Thermally induced birefringence. Methods for suppressing and compensating thermal effects.

17. Frequency conversion of laser radiation. Generation of harmonics of laser radiation. Optical Parametric Generators.

18. Stimulated Raman scattering. Raman lasers.

19. Interaction of laser radiation with matter. Linear types of laser heating of materials, and temperature estimates in the area of laser exposure for typical regimes.

20. Laser-induced damage mechanisms in optical materials (brief description of the key mechanisms).

21. Interaction of laser radiation with biological tissues. Coagulation, carbonization, and ablation of biological tissues. Mechanisms and models of laser ablation of biological tissues. Lasers for surgery of soft and hard tissues.

22. Laws describing the propagation of light in biological tissues. Basic optical characteristics of biological tissues. Transmission, absorption and scattering spectra of biological tissues. Lasers for medical diagnostics and low-intensity therapy.

23. Methods and schemes of laser spectroscopy. Classification of linear methods. Absorption spectroscopy. Excitation spectroscopy.

24. Methods and schemes of laser spectroscopy. Opto-acoustic spectroscopy. Laser magnetic resonance spectroscopy. Stark spectroscopy.

25. Bouguer's law. Relationship between absorption and dispersion, Kramers-Kronig relations.

26. Nonlinear laser spectroscopy. Saturation spectroscopy, stabilization of laser generation frequency. Sub-Doppler Laser spectroscopy. Polarization spectroscopy.

27. Laser heterodyne spectroscopy. Time-resolved spectroscopy. Principles of multiphoton spectroscopy.

28. Laser Raman spectroscopy. Anti-Stokes Raman spectroscopy.

29. Cooperative effects in optics. Self-induced transparency. Single-mode model of superradiance.

30. Superradiance in systems with dimensions less than the wavelength of radiation. Superradiance of extended systems. Superradiance in Raman scattering of light.

**Рекомендованная литература для научной специальности 1.3.19. «Лазерная физика»**

Ханин Я.И. Основы динамики лазеров. – М.: Наука: ФИЗМАТЛИТ, 1999.

Звелто О. Принципы лазеров / О. Звелто; пер. с англ. Д.Н. Козлова [и др.]; под науч. ред. Т. А. Шмаонова. – Изд. 4-е. – СПб. [и др.]: Лань, 2008.

Мандель Л., Вольф Э. Оптическая когерентность и квантовая оптика. – М.: Физматлит, 2000.

Лангдсберг Г.С. Оптика. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.

Мезенов А.В., Сомс Л.Н., Степанов А.И. Термооптика твердотельных лазеров – Л.: Машиностроение, 1986.

Быков В. П., Силичев О.О. Лазерные резонаторы. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004.

Дмитриев В.Г., Тарасов Л.В. Прикладная нелинейная оптика. –2-е изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004.

Летохов В.С., Чеботаев В.П. Нелинейная лазерная спектроскопия сверхвысокого разрешения. – М.: Наука, 1990.

Ананьев Ю.А. Оптические резонаторы и лазерные пучки. М.: Наука, 1990.

Тучин, В. В. Оптика биологических тканей. Методы рассеяния света в медицинской диагностике / В. В. Тучин. — М.: Физматлит, 2013. — 818 с.

Лазерная инженерия хрящей / под ред. В.И.Багратишвили, Э.Н.Соболя, А.Б.Шехтера. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006.

В.П. Вейко, М.Н. Либенсон, Г.Г. Червяков, Е.Б. Яковлев. Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика). Под редакцией чл.-корр. РАН В.И. Конова. Физматлит. М.: 2008 г.

Л. Аллен, Дж. Эберли. Оптический резонанс и двухуровневые атомы. — М.: Мир, 1978.

Андреев А. В. и др, Кооперативные явления в оптике: Сверхизлучения. Бистабильность. Фазовые переходы. М.: Наука, 1988