

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»
Физический факультет

УТВЕРЖДАЮ

И.о. декана физического факультета МГУ,
профессор, д.ф.-м.н.



РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Приборы и методы экспериментальной физики

Instruments and methods of experimental physics

Программа (программы) подготовки
научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре
Приборы и методы экспериментальной физики
(103-01-00-132-фмн)

Москва 2024

Рабочая программа дисциплины разработана в соответствии с Приказом по МГУ от 24 ноября 2021 года № 1216 «Об утверждении Требований к основным программам подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре, самостоятельно устанавливаемых Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова».

1. Краткая аннотация:

Название дисциплины: Приборы и методы экспериментальной физики.

Цель изучения дисциплины – расширение и углубление знаний о современном состоянии и тенденциях развития в области приборов и методов экспериментальной физики.

2. Уровень высшего образования - подготовка кадров высшей квалификации.

3. Научная специальность: 1.3.2 Приборы и методы экспериментальной физики; область науки: естественные науки.

4. Место дисциплины (модуля) в структуре Программы аспирантуры: дисциплины (модули), направленные на подготовку к кандидатским экзаменам - Дисциплина, совпадающая с наименованием научной специальности.

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

*Объем дисциплины (модуля) составляет 3 зачетных единицы, всего **108** часов, из которых **54** часа составляет контактная работа аспиранта с преподавателем **37** часов занятия лекционного типа, **17** часов мероприятия текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации), **54** часа составляет самостоятельная работа учащегося.*

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

Необходимы знания высшей математики и общей физики в объеме курсов, преподаваемых на физических специальностях классических университетов, полученных на предыдущих уровнях высшего образования.

7. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля), форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)	Всего (часы)	В том числе								
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них						Самостоятельная работа обучающегося, часы из них		
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Групповые консультации	Индивидуальные консультации	Учебные занятия, направленные на проведение текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации	Всего	Выполнение домашних заданий	Подготовка к коллоквиумам	Всего
Тема 1. Методы измерения основных физических величин <i>Методы измерения времени, погрешности измерений, эталоны.</i> <i>Учет эффектов общей теории относительности (зависимость хода часов от ускорения и гравитации)</i> <i>Измерение частот в радиодиапазоне. Атомные стандарты частоты.</i> <i>Методы и погрешности измерений координат, углов, длин.</i> <i>Мировые стандарты и эталоны.</i> <i>Методы измерения термодинамических величин.</i>	8	3				1	4	4		4

Методы измерения температуры контактными и бесконтактными методами. Радиоспектроскопия (эффект Зеемана, ядерный магнитный резонанс, томография). Электромагнитные измерения. Емкостные и индуктивные датчики. Способы регистрации радиоизлучения.										
Тема 2. Оптические измерения Оптоволоконные сенсоры. Интерферометры Майкельсона и Фабри-Перо. Счетчики единичных фотонов. Фотоумножители, лавинные фотодетекторы. Принцип действия. Интерферометр Маха-Цандера. Интерференция световых пучков и единичных фотонов. Разрешающая способность оптических приборов. Критерий Релея. Высокоскоростная регистрация быстротекущих процессов. CCD камеры.	8	3				1	4	4		4
Тема 3. Микроскопические измерения. Разрешающая способность оптических приборов. Критерий Релея. Высокоскоростная регистрация	8	3				1	4	4		4

быстропротекающих процессов. CCD камеры. Принцип действия электронного микроскопа, предельное разрешение. Понятие об электронно-лучевой томографии. Тунельный и атомно-силовой микроскопы. Принцип действия, пространственное разрешение.										
Тема 4. Микроволновые и терагерцовые измерения. Основные принципы детектирования непрерывного и импульсного электромагнитного излучения в инфракрасном и терагерцовом диапазоне. Типы и принципы работы тепловизоров. Приборная реализация абсолютно черного тела. Электронные устройства терагерцового излучения. Лазеры на свободных электронах, синхротронные ускорители: принципы работы и сравнительные параметры.	8	3				1	4	4		4
Тема 5. Регистрация элементарных частиц. Регистрация частиц и радиоактивных излучений (ионизационные камеры, газоразрядные счетчики,	8	3				1	4	4		4

пропорциональные счетчики, стриммерные и искровые камеры, полупроводниковые детекторы, сцинтилляционные счетчики, пузырьковые камеры, черенковские счетчики, ядерные фотоэмульсии).										
Тема 6. Приборы для лабораторных измерений. Методы получения высокого вакуума. Методы получения низких температур. Криостат растворения. Магнитное охлаждение. Регистрация частиц и радиоактивных излучений (ионизационные камеры, газоразрядные счетчики, пропорциональные счетчики, стриммерные и искровые камеры, полупроводниковые детекторы, сцинтилляционные счетчики, пузырьковые камеры, черенковские счетчики, ядерные фотоэмульсии). Шумы и помехи при измерении электрических, акустических и оптических величин. Фундаментальные пределы чувствительности	8	3				1	4	4		4
Тема 7. Основы фундаментальной метрологии	8	3				1	4	4		4

Международная система единиц СИ. Определение основных единиц через фиксированные значения фундаментальных физических постоянных. Практическая реализация основных единиц системы СИ. Прямые, косвенные, статистические и динамические измерения. Оценки погрешностей косвенных измерений. Условные измерения. Проблема корреляций и уравнивание условных измерений. Принципиальные ограничения на точность измерений (физические пределы). Фундаментальные шумы в измерительных устройствах. Тепловой шум. Формула Найквиста. Флуктуационно-диссипативная теорема. Дробовой шум в электронных и оптических приборах. Шумы $1/f$.										
Тема 8. Статистические измерения Случайные события. Понятие вероятности. Условные вероятности. Распределение вероятности. Плотность вероятности. Моменты. Нормальное распределение и центральная предельная теорема. Специальные распределения	8	3				1	4	4		4

вероятностей и их использование в физике. Биномиальное распределение, распределение Пуассона (дробовой шум). Многомерные распределения вероятностей. Корреляции случайных величин. Стационарные случайные процессы. Эргодичность. Спектральная плотность. Теорема Винера-Хинчина.										
Тема 9. Квантовые измерения Квантовые эффекты в физических измерениях. Условия, когда классический подход становится неприменим. Соотношения неопределенности. Роль обратного флуктуационного влияния прибора. Стандартные квантовые пределы. Квантовые невозмущающие измерения. Квантовые эталоны единиц физических величин (примеры). Эффект Джозефсона и сверхпроводящие квантовые интерферометры. Квантовый эффект Холла. Квантовые перепутанные состояния. Генерация и свойства фотонных пар.	8	3				1	4	4		4
Тема 10. Критерии точности измерений Оценка параметров случайных	8	3				1	4	4		4

величин. Выборочные средние и дисперсии. Выборочные распределения. t-распределение Стьюдента, χ^2-распределение Техника оценки параметров при разных распределениях погрешностей измерений. Средние и вероятные значения переменных. Суммирование результатов различных измерений. Параметрические и непараметрические оценки Корреляционная функция случайного процесса. . Корреляции случайных величин.										
Тема 11. Методы анализа физических измерений Цифровая обработка сигнала. Цифровые фильтры. Аналитическая аппроксимация результатов измерений. Интерполяция (линейная, квадратичная и т. п.). Фурье-анализ. Дискретное преобразование Фурье. Быстрое преобразование Фурье. Анализ сигналов на основе вейвлет-преобразования, оконное преобразование Фурье-Габора. Анализ изображений при панорамной регистрации физических полей. Статистическая проверка	8	3				1	4	4		4

гипотез. Критерии согласия и методы их использования. Критерий χ^2, Смирнова-Колмогорова, Колмогорова. Метод максимального правдоподобия и его применение. Метод наименьших квадратов. Обратные задачи при анализе результатов измерений и методы их решения										
Тема 12. Автоматизация эксперимента •Типовая структура автоматизированной системы экспериментальных исследований. Преобразование аналоговых сигналов в цифровые и обратно. Контроль процессов измерений в реальном времени. Физические ограничения быстродействия. Программно-аппаратные среды для комплексного управления и обработка результатов физического эксперимента на примере LabView, MatLab. Использование ПЛИС.	8	2				1	3	5		5
Тема 13. Численное моделирование физических экспериментов. Методы численного моделирования физических процессов.	8	2				1	3	5		5

<i>Метод конечных элементов. Применение стандартных сумма по столбцу не такая пакетов (на примере MatLab, Comsol). Прямые и обратные задачи. Некорректные задачи.</i>										
Промежуточная аттестация: допуск к кандидатскому экзамену	4					4	4			
Итого	108	37				17	54	54		54

8. Образовательные технологии

Используемые формы и методы обучения: лекции и семинарские занятия, самостоятельная работа аспирантов.

В процессе преподавания дисциплины преподаватель использует как классические формы и методы обучения (лекции и семинарские занятия), так и активные методы обучения.

При проведении лекционных занятий преподаватель использует при необходимости аудиовизуальные, компьютерные и мультимедийные средства обучения, а также демонстрационные и наглядно-иллюстрационные (в том числе раздаточные) материалы.

9. Учебно-методические материалы для самостоятельной работы по дисциплине (модулю): аспирантам предоставляется программа курса, план занятий и задания для самостоятельной работы, презентации к лекционным занятиям.

10. Ресурсное обеспечение:

Основная литература:

1. Кунце Х.-И. Методы физических измерений.- Москва; Издательство «Мир» 1989.
2. Нефедов В. И., Сигов А.С., Битюков В. К., Хахин В. И. Метрология и радиоизмерения, Москва: Издательство "Высшая школа", 2006.
3. Боровков А.А. Математическая статистика. М.: 1984.
4. Бароне А., Патерио Д. Эффект Джозефсона: Физика и применения / Пер. с англ. М.: 1984.
5. Брагинский В. Б., Манукин А. Б. Измерение малых сил в физических экспериментах. М.: Наука, 1974.
6. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. ИД Спектр, Москва. 2009. 544 стр.
7. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение. Москва «Мир». 1988. 400 стр.
8. Пергамент М.И. Методы исследований в экспериментальной физике. Учебное пособие. ИД Интеллект. 2010. 304 стр.
9. Чжан Си-Чен, Шю Джингджю, Терагерцовая фотоника, перевод с английского под редакцией С.В.Гарнова и А.П.Шкуринова. Москва, Ижевск, 2016, 334 стр.
10. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов: учеб. Пособие. – 3-е изд. – СПб.:БХВ-Петербург, 2011. 768 с.

Дополнительная литература:

1. Риле Ф. Стандарты частоты. Принципы и приложения / Пер. с англ. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 512 с.
2. Клаассен К.Б. Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике. М.: Постмаркет, 2002. -352 с.
3. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов: учеб. Пособие. – 3-е изд. – СПб.:БХВ-Петербург, 2011. – 768 с.
4. Харт Х. Введение в измерительную технику. М. Мир, 1999.
5. Худсон Д. Статистика для физиков.- Москва; Издательство «Мир» 1967.
6. Воронцов Ю.И. Теория и методы макроскопических измерений. М.: Наука, 1989.

11. Язык преподавания – русский

12. Преподаватели:

Д.ф.-м.н., профессор Биленко Игорь Антонович, e-mail: igorbilenko@gmail.com, тел.: +79161419953

Фонды оценочных средств, необходимые для оценки результатов обучения

Образцы домашних заданий:

1. Рассчитать коэффициент преобразования ёмкостного датчика, частота колебательного контура 10 МГц, добротность 300, ёмкость 50 пФ, зазор между пластинами 20 мкм.
2. Рассчитать ширину линии резонатора Фабри-Перо для длины волны 1550 нм, коэффициент отражения зеркал $R = 0.995$.
3. Исходя из критерия Рэлея оценить максимальную разрешающую способность оптического, электронного и туннельного микроскопов.
4. Рассчитать скорость откачки турбомолекулярным насосом с диаметром входного отверстия 100 мм.
5. Доказать теорему Шоттки для лампового диода в приближении малой объёмной плотности заряда.
6. Рассчитать среднее значение и дисперсию для когерентного состояния осциллятора без потерь, на который действует внешняя резонансная сила $F = A \cos \omega t$ в течении времени t_0 .
7. Рассчитать среднее значение и дисперсию для состояния осциллятора без потерь, резонансная частота которого меняется по закону $\omega = \omega_0 + m \cos 2\omega_0 t$ в течение времени t_0 .
8. Рассчитать автокорреляционную функцию для фликкерного шума.
9. Написать программу для вычисления спектральной плотности шума по оцифрованным IQ данным.
10. Предложить алгоритм автоматического регулирования для настройки лазера на резонансную частоту внешнего эталона, если постоянная времени управляющего элемента составляет 0.1 сек,
11. Частота дискретизации АЦП 100 кГц, частотные флуктуации лазера содержат белый и $1/f$ шум.

Методические материалы для проведения процедур оценивания результатов обучения

Зачет проходит по билетам, включающем 3 вопроса. Уровень знаний аспиранта по каждому вопросу на «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно». В случае если на все вопросы был дан ответ, оцененный не ниже чем «удовлетворительно», аспирант получает общую оценку «зачтено».

Шкала оценивания знаний, умений и навыков

Результат освоения дисциплины	Критерии оценивания знаний, умений и навыков			
	2/ не зачтено	3/ зачтено	4/ зачтено	5/ зачтено
Знания	Отсутствие знаний основных законов радиофизики, методов физических измерений.	В целом успешные, но не систематические знания основных	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы знания основных	Успешные и систематические знания основных законов

		законов радиофизики, методов физических измерений	законов радиофизики, методов физических измерений	радиофизики, методов физических измерений
Умения	Отсутствие умения применять знания основных радиофизики, методов физических измерений, использовать современные приборы для решения научных задач	В целом успешное, но не систематическое применять знания основных радиофизики, методов физических измерений, использовать современные приборы для решения научных задач	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение применять знания основных радиофизики, методов физических измерений, использовать современные приборы для решения научных задач	Успешное и систематическое умение применять знания основных радиофизики, методов физических измерений, использовать современные приборы для решения научных задач
Навыки	Отсутствие/фрагментарное умение использовать приборы и методы физических измерений	В целом успешное, но не систематическое умение использовать приборы и методы физических измерений	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение использовать приборы и методы физических измерений	Успешное и систематическое умение использовать приборы и методы физических измерений