

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»  
(Новосибирский государственный университет, НГУ)

**Физический факультет  
Кафедра квантовой электроники**



**Рабочая программа дисциплины  
Оптическая магнитометрия**

Направление подготовки **03.04.02 Физика**

Направленность (профиль): **Общая и фундаментальная физика**

Форма обучения **Очная**

| Семестр                                                                    | Общий<br>объем | Виды учебных занятий (в часах)                    |                         |                           |                                                          | Промежуточная аттестация<br>(в часах)                         |                                                      |       |                               |         |
|----------------------------------------------------------------------------|----------------|---------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-------|-------------------------------|---------|
|                                                                            |                | Контактная работа обучающихся<br>с преподавателем |                         |                           | Самостоятельная ра-<br>бота, не включая период<br>сессии | Самостоятельная подго-<br>товка к промежуточной<br>аттестации | Контактная работа<br>обучающихся с<br>преподавателем |       |                               |         |
|                                                                            |                | Лекции                                            | Практические<br>занятия | Лабораторные за-<br>нятия |                                                          |                                                               | Консультации                                         | Зачет | Дифференциро-<br>ванный зачет | Экзамен |
| 1                                                                          | 2              | 3                                                 | 4                       | 5                         | 6                                                        | 7                                                             | 8                                                    | 9     | 10                            | 11      |
| 1                                                                          | 72             | 32                                                | 8                       |                           | 22                                                       | 8                                                             |                                                      |       | 2                             |         |
| Всего 72 часа / 2 зачётные единицы, из них:<br>- контактная работа 42 часа |                |                                                   |                         |                           |                                                          |                                                               |                                                      |       |                               |         |
| Компетенции ПК-1                                                           |                |                                                   |                         |                           |                                                          |                                                               |                                                      |       |                               |         |

Руководитель программы  
д.ф.-м.н.

И.Б. Логашенко

**Новосибирск 2026**

## Содержание

|                                                                                                                                                                |   |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|
| 1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы. ....                  | 3 |
| 2. Место дисциплины в структуре образовательной программы: ..... <b>Ошибка! Закладка не определена.</b>                                                        |   |
| 3. Трудоемкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем ..... | 4 |
| 4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий. ....    | 4 |
| 5. Перечень учебной литературы. .... <b>Ошибка! Закладка не определена.</b>                                                                                    |   |
| 6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся. ...                                                                          | 8 |
| 7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины. ....                                             | 8 |
| 8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине. ....                                            | 8 |
| 9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.....                                                    | 8 |
| 10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине. ....                                                         | 9 |

# 1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.

Дисциплина «**Оптическая магнитометрия**» является базовой в образовательной магистерской программе «Квантовые информационные технологии», содержит одну часть четырехсеместрового цикла и необходима для овладения основными представлениями о магнитометрии как области современной экспериментальной физики и квантовых сенсоров. В курсе последовательно рассматриваются общие принципы измерения магнитных полей, основные классы магнитометров, а затем подробно изучаются оптические магнитометры на парах щелочных атомов и родственные квантовые сенсоры.

Целью курса является освоение физических основ, экспериментальных схем и методов анализа оптических магнитометров, включая оптическую накачку, эффект Ханле, нелинейное магнитооптическое вращение, схемы Белла–Блума, поляризметрическую регистрацию, активную стабилизацию и экранирование магнитного поля.

| Результаты освоения образовательной программы (компетенции)                                                                                                                                                                               | Индикаторы                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Результаты обучения по дисциплине                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>ПК-1</b> Способен использовать специализированные знания в области физики при решении поставленных задач в научно-исследовательской деятельности в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования. | <p><b>ПК 1.1</b> Применяет специализированные знания в области физики при решении конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.</p> <p><b>ПК 1.2</b> Выбирает наиболее эффективные методы решения конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.</p> | <p><b>Знать</b> методы постановки и решения задач экспериментальной магнитометрии, основные типы магнитометров, методы калибровки, оценки чувствительности, полосы пропускания, динамического диапазона и бюджета шумов; знать физические основы ларморовской прецессии, зеемановского расщепления, оптической накачки, спиновой релаксации, эффекта Ханле, поляризационного вращения, Bell-Bloom-возбуждения, Mx/Mz-, SERF-, CPT- и NMOR-режимов работы оптических магнитометров.</p> <p><b>Уметь</b> самостоятельно формулировать экспериментальную задачу, выбирать схему магнитометра и метод регистрации, проводить расчет основных параметров оптического магнитометра и анализировать измерительные данные; уметь применять аппарат атомной физики, квантовой электроники и лазерной спектроскопии для анализа сигналов оптически накачиваемых магнитометров, оценки влияния параметров ячейки, лазерного излучения, температуры и внешних полей.</p> |

| Результаты освоения образовательной программы (компетенции) | Индикаторы | Результаты обучения по дисциплине                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|-------------------------------------------------------------|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                             |            | <b>Владеть</b> навыками постановки и решения задач научных исследований в области оптической магнитометрии с использованием современных средств теоретического описания, цифровой обработки сигналов и экспериментального анализа; владеть базовыми методами расчетного и экспериментального анализа оптических магнитометров, включая моделирование резонансных кривых, оценку шумов, поляриметрическое детектирование и интерпретацию результатов практических заданий. |

2. Дисциплина «**Оптическая магнитометрия**» реализуется в 1 семестре 1-го курса магистратуры. Курс относится к циклу фундаментальных общефизических дисциплин. В результате прохождения курса у студентов физического факультета должно сформироваться представление о областях квантовой электроники, лазерной физики, атомной физики, квантовых сенсоров, биоманитных измерений и экспериментальной метрологии.

Для успешного освоения курса необходимы знания математического анализа, линейной алгебры, общей физики, электродинамики, оптики, квантовой механики, атомной физики и основ радиоэлектроники. Желательны базовые навыки обработки экспериментальных данных и работы с программными средствами анализа сигналов.

В результате прохождения курса у студентов должно сформироваться представление о физических принципах работы магнитометров различных типов и о роли оптических магнитометров в современной прецизионной физике. Курс связан с дисциплинами по квантовой электронике, лазерной спектроскопии, атомной физике, методам экспериментальной физики, цифровой обработке сигналов и измерительной технике.

В последние годы оптически накачиваемые магнитометры активно развиваются как чувствительные, компактные и потенциально масштабируемые сенсоры для фундаментальных исследований, геофизики, неразрушающего контроля, магнитокардиографии, магнитоэнцефалографии, навигационных и метрологических приложений. Поэтому курс имеет как фундаментальную, так и прикладную направленность.

### 3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем

Трудоёмкость дисциплины составляет: 2 зачётные единицы, 72 часа.

Форма промежуточной аттестации: 1 семестр – дифференцированный зачет.

| № | Вид деятельности | Семестр |
|---|------------------|---------|
|   |                  | 1       |
| 1 | Лекции, ч        | 32      |

|    |                                      |    |
|----|--------------------------------------|----|
| 2  | Практические занятия, ч              | 8  |
| 3  | Лабораторные занятия, ч              | -  |
| 4  | Занятия в контактной форме, ч из них | 42 |
| 5  | аудиторных занятий, ч                | 40 |
| 6  | в электронной форме, ч               | -  |
| 7  | консультаций, час.                   | -  |
| 8  | промежуточная аттестация, ч          | 2  |
| 9  | Самостоятельная работа, час.         | 30 |
| 10 | Всего, ч                             | 72 |

**4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий.**

**Программа и основное содержание лекций (32 часа)**

1. Введение в магнитометрию.
  - 1.1. Физические величины и единицы измерения магнитного поля, принцип расчета. Чувствительность, полоса пропускания, динамический диапазон, абсолютные и относительные измерения.
  - 1.2. Классификация магнитометров и рассмотрение принципа работы: индукционные, феррозондовые, на основе эффекта Холла, магниторезистивные, протонные, магнитометры Оверхаузера, SQUID, атомные и оптические, магнитометры на NV-центрах.
  - 1.3. Рассмотрение областей применения различных типов магнитометров. Рассмотрение применения магнитометров на основе оптической накачки.
  - 1.4. Сравнение различных типов магнитометров для заданных задач: геофизика, МКГ, МЭГ, лабораторная диагностика.
2. Общие физические основы магнитных измерений.
  - 2.1. Ларморовская прецессия, гиромангнитное отношение, зеемановское расщепление.
  - 2.2. Анализ формы магниторезонансных кривых: амплитудная и дисперсионная компоненты, ширина и добротность.
  - 2.3. Сравнение классических и квантовых сенсоров по чувствительности, стабильности, габаритам и рабочим условиям.
  - 2.4. Понятия скалярного и векторного магнитометра, градиометра.
3. Атомно-физические основы оптической магнитометрии
  - 3.1. Щелочные атомы Rb, Cs, K. D-линии, сверхтонкая структура, правила отбора, поляризация света.
  - 3.2. Оптическая плотность, доплеровское и столкновительное уширение, буферные газы и антирелаксационные покрытия стенок поглощающих ячеек.
  - 3.3. Релаксация спиновой поляризации: столкновения со стенками, спин-обмен, спин-разрушение, диффузия атомов.
4. Теория оптической накачки
  - 4.1. Оптическая ориентация и выстраивание атомных моментов. Скоростные уравнения и элементы матричного описания.
  - 4.2. Баланс накачки и релаксации. Влияние мощности, отстройки, поляризации и геометрии лучей.
  - 4.3. Связь оптической накачки с магнитным резонансом и регистрацией спиновой динамики.
5. Эффект Ханле, поляризационное вращение и резонансы нулевого поля

- 5.1. Эффект Ханле в поглощении и поляризационном вращении. Форма резонанса, ширина, контраст, релаксация.
- 5.2. Нелинейное магнитооптическое вращение (NMOR). Поляриметрическая методика регистрации.
- 5.3. Схемы  $M_x$  и  $M_z$ , радиочастотное возбуждение и оптически детектируемый магнитный резонанс.
6. Современные режимы оптических магнитометров
  - 6.1. SERF-магнитометры: условия подавления спин-обменной релаксации, преимущества и ограничения.
  - 6.2. СРТ/ЕПТ-магнитометры и роль когерентного пленения населённости.
  - 6.3. Однолучевые и двухлучевые схемы, векторные измерения и градиометрические конфигурации.
7. Магнитометр Белла–Блума
  - 7.1. Оптически возбуждаемая прецессия спина. Амплитудная, частотная и поляризационная модуляция света.
  - 7.2. Дисперсионный и абсорбционный сигналы, фазочувствительное детектирование, техника синхронного детектирования.
  - 7.3. Оценка чувствительности и полосы пропускания.
8. Практическая реализация оптических магнитометров
  - 8.1. Пассивное и активное магнитное экранирование: магнитомягкие материалы, катушки компенсации, стабилизация нулевого и ненулевого поля.
  - 8.2. Атомные ячейки: материал, заполнение, буферные газы, покрытия, нагрев и термостабилизация.
  - 8.3. Источники шума: фотонный шум, технический шум лазера, магнитный шум, шум электроники. Калибровка и обработка данных.

## Программа практических занятий (8 часов)

1. Введение в магнитометрические характеристики
  - 1.1. Расчет чувствительности, полосы пропускания, динамического диапазона и минимально обнаружимого поля.
2. Ларморовская прецессия и зеемановские масштабы
  - 2.1. Расчет ларморовских частот для Rb и Cs в земном, слабом и компенсированном поле.
3. Оптическая накачка и релаксация
  - 3.1. Оценка скорости оптической накачки и времени релаксации атомной поляризации.
  - 3.2. Влияние температуры, плотности паров, буферного газа и покрытия стенок ячейки на сигнал магнитометра.
4. Поляриметрическая методика регистрации и эффект Ханле
  - 4.1. Расчет сигнала балансного поляриметра и предельной чувствительности по фотонному шуму.
  - 4.2. Обработка модельных данных резонанса Ханле/NMOR и извлечение ширины, контраста и релаксационных параметров. Проведение прямых экспериментов регистрации магнитооптических резонансов Ханле.
5. Магнитометр Белла–Блума
  - 5.1. Выбор частоты модуляции для заданного поля, анализ фазового и амплитудного отклика.
  - 5.2. Разбор схемы фазочувствительного детектирования, построение частотной обратной связи и оценка калибровочного коэффициента. Проведение фактических экспериментов в схеме Белла-Блума в поле Земли.
6. Экранирование и активная компенсация

- 6.1. Расчет поля катушек Гельмгольца и градиентных катушек, построение матрицы калибровки катушек.
- 6.2. Сравнение пассивного экранирования, активной компенсации и гибридных схем стабилизации поля.
7. Термостабилизация и атомная ячейка
  - 7.1. Расчет температурного режима ячейки, плотности паров Rb/Cs и влияния температуры на оптическую плотность.
  - 7.2. Обсуждение конструкций нагрева, термоизоляции и способов уменьшения магнитных помех от нагревателей.
8. Итоговое практическое занятие
  - 8.1. Защита расчетно-графической работы или мини-проекта по выбранной схеме оптического магнитометра.
  - 8.2. Обсуждение ошибок, ограничений чувствительности, способов модернизации и перспектив применения предложенной схемы.

### Самостоятельная работа студентов (30 часов)

| Перечень занятий на СРС                                                                        | Объем, час |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Решение индивидуальных домашних заданий, подготовке к защитах индивидуальных домашних заданий. | 8          |
| Самостоятельное изучение материалов теоретических занятий, подготовке к практическим занятиям. | 8          |
| Подготовка расчетно-графической работы.                                                        | 6          |
| Подготовка к дифференцированному зачету                                                        | 8          |

### 5. Перечень литературы:

1. Демтрёдер, Вольфганг. Современная лазерная спектроскопия: [учебное пособие для студентов вузов] / В. Демтрёдер ; пер. с англ. М.В. Рябининой [и др.] ; под ред. Л.А. Мельникова. Долгопрудный: Интеллект, 2014. 1071 с.: ил.; 24 см. ISBN 978-5-91559-114-0. (7 экз)
2. Салех, Бахаа Е. А. Оптика и фотоника. Принципы и применения: [учебное пособие: в 2 т.] / Б. Салех, М. Тейх; пер. с англ. В.Л. Дербова. Долгопрудный: Интеллект, 2012.; 25х17 см. Т.1. 2012. 759 с.: ил., [4] л. ил. ISBN 978-5-91559-038-9. (3 экз.)
3. Салех, Бахаа Е. А. Оптика и фотоника. Принципы и применения: [учебное пособие: в 2 т.] / Б. Салех, М. Тейх; пер. с англ. В.Л. Дербова. Долгопрудный: Интеллект, 2012.; 25х17 см. Т.2. 2012. 780 с.: ил., [8] л. ил. ISBN 978-5-91559-135-5.(4 экз)
4. Budker D., Jackson Kimball D. F. (eds.) Optical Magnetometry. — Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
5. Budker D., Romalis M. Optical magnetometry // Nature Physics. — 2007. — Vol. 3. — P. 227–234.
6. Александров Е. Б., Вершовский А. К. Современные радиооптические методы квантовой магнитометрии // Успехи физических наук. — 2009. — Т. 179, № 6. — С. 605–637.
7. Happer W. Optical Pumping // Reviews of Modern Physics. — 1972. — Vol. 44. — P. 169–249.

8. Bell W. E., Bloom A. L. Optically Driven Spin Precession // Physical Review Letters. — 1961. — Vol. 6. — P. 280–281.
9. Cohen-Tannoudji C., Dupont-Roc J., Grynberg G. Atom–Photon Interactions: Basic Processes and Applications. — Wiley, 1992.
10. Kitching J., Knappe S., Donley E. A. Atomic Sensors — A Review // IEEE Sensors Journal. — 2011. — Vol. 11, No. 9. — P. 1749–1758.
11. Seltzer S. J. Developments in Alkali-Metal Atomic Magnetometry. — PhD thesis, Princeton University, 2008.
12. Grujić Z. D., Weis A. Atomic magnetic resonance induced by amplitude-, frequency-, or polarization-modulated light // Physical Review A. — 2013. — Vol. 88. — 012508.
13. Allred J. C., Lyman R. N., Kornack T. W., Romalis M. V. High-sensitivity atomic magnetometer unaffected by spin-exchange relaxation // Physical Review Letters. — 2002. — Vol. 89. — 130801.

**6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.**

Дополнительные учебно-методические материалы не требуются.

**7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.**

Для освоения дисциплины используются следующие ресурсы:

- электронная информационно-образовательная среда НГУ (ЭИОС);
- образовательные интернет-порталы;
- информационно-телекоммуникационная сеть Интернет.

**7.1 Современные профессиональные базы данных**

Не используются

**7.2. Информационные справочные системы**

Не используются.

**8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.**

1. Для обеспечения реализации дисциплины используется стандартный комплект программного обеспечения (ПО), включающий регулярно обновляемое лицензионное ПО Windows и MSOffice. Для практических занятий и самостоятельной работы могут использоваться Python, Origin, MATLAB или аналогичные средства обработки экспериментальных данных, построения графиков, аппроксимации резонансных кривых и численного моделирования динамики спиновой поляризации.
2. При наличии экспериментальной базы используются программные средства управления измерительной аппаратурой, генераторами, осциллографами, lock-in усилителями и системами сбора данных. Допускается применение электронного обучения и дистанционных технологий для демонстрации установок, разбора данных и защиты расчетно-графических работ.

**9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.**

Для реализации дисциплины «**Оптическая магнитометрия**» используются специальные помещения:

1. Учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа, практических занятий, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля, промежуточной и итоговой аттестации.

## 2. Помещения для самостоятельной работы обучающихся.

Учебные аудитории укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду НГУ и ИЛФ СО РАН.

Реализация дисциплины осуществляется с применением электронного обучения (платформа яндекс-телемост), где обучение проводится на виртуальных аналогах, позволяющим достигать запланированных результатов по дисциплине.

Для проведения занятий лекционного типа предлагаются следующие наборы демонстрационного оборудования и учебно-наглядных пособий:

- комплект лекций-презентаций по темам дисциплины (используется PowerPoint);

Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине для обучающихся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья осуществляется согласно «Порядку организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья в Новосибирском государственном университете».

## 10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.

### 10.1 Порядок проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине

#### *Текущий контроль*

Оценочным средством для текущего контроля успеваемости в части самостоятельной работы является регулярная сдача-приемка домашних заданий и работа на практических занятиях. Успешная сдача домашних заданий является обязательным условием.

#### *Промежуточная аттестация*

Освоение компетенций оценивается согласно шкале оценки уровня сформированности компетенции. Положительная оценка по дисциплине выставляется в том случае, если заявленная компетенция ПК-1 сформирована не ниже порогового уровня в части, относящейся к формированию способности использовать специализированные знания в области оптической магнитометрии в профессиональной деятельности.

Окончательная оценка работы студента в течение семестра происходит на дифференцированном зачете, который проводится в конце семестра в устной форме в виде студенческих презентаций, на которых студенты представляют результаты выполнения расчетно-графического задания.

Вывод об уровне сформированности компетенций принимается преподавателем. Каждый вопрос билета оценивается от 0 до 5 баллов. Положительная оценка ставится, когда все компетенции освоены не ниже порогового уровня. Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации.

### 10.2 Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Оптическая магнитометрия».

Таблица 10.1

| Индикатор | Результат обучения по дисциплине | Оценочные средства |
|-----------|----------------------------------|--------------------|
|-----------|----------------------------------|--------------------|

|                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| <p><b>ПК 1.1</b> Применяет специализированные знания в области физики при решении конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.</p> | <p><b>Знать</b> методы постановки и решения задач экспериментальной магнитометрии, основные типы магнитометров, методы калибровки, оценки чувствительности, полосы пропускания, динамического диапазона и бюджета шумов; знать физические основы ларморовской прецессии, зеемановского расщепления, оптической накачки, спиновой релаксации, эффекта Ханле, поляризационного вращения, Bell–Bloom-возбуждения, Mx/Mz-, SERF-, CPT- и NMOR-режимов работы оптических магнитометров.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | <p>Сдача заданий, дифференцированный зачет.</p> |
| <p><b>ПК 1.2</b> Выбирает наиболее эффективные методы решения конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.</p>                     | <p><b>Уметь</b> самостоятельно формулировать экспериментальную задачу, выбирать схему магнитометра и метод регистрации, проводить расчет основных параметров оптического магнитометра и анализировать измерительные данные; уметь применять аппарат атомной физики, квантовой электроники и лазерной спектроскопии для анализа сигналов оптически накачиваемых магнитометров, оценки влияния параметров ячейки, лазерного излучения, температуры и внешних полей.</p> <p><b>Владеть</b> навыками постановки и решения задач научных исследований в области оптической магнитометрии с использованием современных средств теоретического описания, цифровой обработки сигналов и экспериментального анализа; владеть базовыми методами расчетного и экспериментального анализа оптических магнитометров, включая моделирование резонансных кривых, оценку шумов, поляриметрическое детектирование и интерпретацию результатов практических заданий.</p> | <p>Сдача заданий, дифференцированный зачет.</p> |

## 10.2 Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Оптическая магнитометрия».

Таблица 10.2

| Критерии оценивания результатов обучения | Шкала оценивания |
|------------------------------------------|------------------|
|------------------------------------------|------------------|

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| <p><b><u>Дифференцированный зачет:</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– самостоятельность, осмысленность, структурированность, логичность и аргументированность изложения материала,</li> <li>– точность и корректность применения терминов и понятий,</li> <li>– наличие исчерпывающих ответов на дополнительные вопросы.</li> </ul> <p>При изложении ответа на вопрос(ы) преподавателя обучающийся мог допустить не принципиальные неточности.</p> | <i>Отлично</i>             |
| <p><b><u>Дифференцированный зачет:</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– самостоятельность, осмысленность, структурированность, логичность и аргументированность изложения материала,</li> <li>– точность и корректность применения терминов и понятий при наличии незначительных ошибок,</li> <li>– наличие полных ответов на дополнительные вопросы с возможным присутствием ошибок.</li> </ul>                                                     | <i>Хорошо</i>              |
| <p><b><u>Дифференцированный зачет:</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– самостоятельность и осмысленность в изложении материала, наличие ошибок в логике и аргументации, а также затруднений при формулировке собственных суждений,</li> <li>– корректность применения терминов и понятий, с множественными ошибками,</li> <li>– наличие неполных и/или содержащих существенные ошибки ответов на дополнительные вопросы.</li> </ul>                 | <i>Удовлетворительно</i>   |
| <p><b><u>Дифференцированный зачет:</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– отсутствие осмысленности, структурированности, логичности и аргументированности в изложении материала,</li> <li>– грубые ошибки в применении терминов и понятий,</li> <li>– отсутствие ответов на дополнительные вопросы.</li> </ul>                                                                                                                                         | <i>Неудовлетворительно</i> |

### 10.3 Типовые контрольные задания и материалы, необходимые для оценки результатов обучения

#### Пример домашнего задания

1. Рассчитать ларморовскую частоту атомов  $^{87}\text{Rb}$  и  $^{133}\text{Cs}$  в магнитном поле Земли и в поле 100 нТл. Определить соответствующую частоту модуляции для Bell–Bloom-магнитометра.
2. По заданной резонансной кривой определить ширину, контраст, калибровочный коэффициент и оценить чувствительность магнитометра.
3. Сравнить несколько типов магнитометров для задачи регистрации магнитокардиографического сигнала: указать преимущества, ограничения и требования к экранированию.
4. Оценить влияние температуры атомной ячейки на плотность паров атомов  $^{87}\text{Rb}$  и  $^{133}\text{Cs}$ , оптическую плотность и ожидаемую амплитуду сигнала.

#### Примеры тем для расчетно-графических работ

1. Модель сигнала магнитометра Белла–Блума и оптимизация частоты модуляции.
2. Расчет и анализ резонанса Ханле в ячейке с парами рубидия или цезия.
3. Оценка предельной чувствительности оптического магнитометра с учетом фотонного и технического шумов.
4. Проект пассивного и активного магнитного экранирования для лабораторного оптического магнитометра.
5. Поляриметрическая методика регистрации: расчет балансного детектора и обработка дисперсионной кривой.
6. Сравнительный анализ SERF-, Mx/Mz-, CPT-, NMOR- и Bell–Bloom-магнитометров для выбранного приложения.
7. Тепловой режим атомной ячейки: нагрев, термостабилизация и влияние температуры на параметры магнитометра.

Оценочные материалы по промежуточной аттестации, предназначенные для проверки соответствия уровня подготовки по дисциплине требованиям ФГОС, хранятся на кафедре-разработчике РПД в печатном и электронном виде.