

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УТВЕРЖДАЮ

Ректор Белорусского
государственного университета

_____ А.Д.Король

27 июня 2025 г.

Регистрационный № 3090/м.



МЕТАМАТЕРИАЛЫ

Учебная программа учреждения образования по учебной дисциплине для
специальности:

7-06-0531-01 Химия

Профилизация: Химический дизайн новых материалов

2025 г.

Учебная программа составлена на основе ОСВО 7-06-0531-01-2023, учебного плана № М44-5.5-04/уч. от 29.12.2022.

СОСТАВИТЕЛЬ:

Д.И.Муравский, старший преподаватель кафедры неорганической химии химического факультета Белорусского государственного университета.

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

В.Б.Оджаев, заведующий кафедрой физики полупроводников и наноэлектроники, физический факультет Белорусского государственного университета, доктор физико-математических наук, профессор.

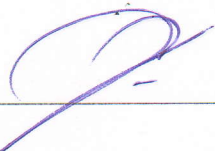
А.И.Кулак, директор Института общей и неорганической химии, академик Национальной академии наук Беларуси, доктор химических наук, профессор.

РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:

Кафедрой неорганической химии БГУ
(протокол № 10 от 06.06.2025)

Научно-методическим советом БГУ
(протокол № 11 от 26.06.2025)

Заведующий кафедрой



Д.В.Свиридов

Т.В. Ковальчук-Кабинская


ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Метаматериалы – перспективный класс функциональных материалов искусственного происхождения, не имеющих аналогов в природе. Благодаря уникальным электромагнитным, акустическим, механическим и термическим свойствам, метаматериалы представляют большой интерес в широком спектре разнообразных приложений: биомедицине, сенсорике, фотокатализе, фотовольтаике и солнечной энергетике, нанофотонике, оптоэлектронике, квантовой информатике и технологиях искусственного интеллекта, устройствах звукоусиления и звукоподавления, сейсмоустойчивых конструкциях и терморегулирующих устройствах. Междисциплинарные знания в области метаматериалов позволят специалистам-химикам не только создавать новые функциональные материалы для описанных применений, но и эффективно внедрять инновационные разработки, основанные на метаматериалах, в химические процессы и технологии для научных и прикладных целей.

Цели и задачи учебной дисциплины

Цель учебной дисциплины – сформировать углубленные знания о методах создания и дизайна, структуре, свойствах и применениях метаматериалов, необходимые для подготовки высококлассных специалистов в области современного материаловедения.

Задачи учебной дисциплины:

1. овладение знаниями о сущности, классификации, особенностях структуры и свойствах метаматериалов;
2. формирование навыков прогнозирования свойств метаматериалов в зависимости от их состава и структуры;
3. освоение физических и коллоидно-химических методов получения и дизайна метаматериалов;
4. формирование компетенций в сфере применения метаматериалов в различных областях химии, физики и биомедицины.

Место учебной дисциплины в системе подготовки специалиста с высшим образованием.

Учебная дисциплина относится к модулю «Перспективные химические технологии и материалы» компонента учреждения образования.

Связи с другими учебными дисциплинами, включая учебные дисциплины компонента учреждения высшего образования, дисциплины специализации и др.

Отдельные вопросы данной дисциплины затрагивают проблематику таких учебных дисциплин компонента учреждения высшего образования, как «Нанохимия», «Коллоидная химия», «Химия твердого тела», «Физическая химия», «Кристаллохимия», «Физические методы исследования», «Супрамолекулярная химия», «Современная биоаналитическая химия». Кроме того, успешное изучение дисциплины «Метаматериалы» потребует знаний по темам электромагнетизм и оптика из дисциплины «Физика».

Требования к компетенциям

Освоение учебной дисциплины «Метаматериалы» должно обеспечить формирование следующих компетенций:

Специализированные компетенции:

Использовать современные концепции строения материи, методы химического материаловедения, молекулярной инженерии для описания свойств функциональных материалов с различной структурной организацией.

Предлагать области применения новых материалов и технологий в химической и фармацевтической отрасли, в научной и инновационной деятельности.

В результате освоения учебной дисциплины студент должен:

знать:

- основные характеристики и современную классификацию метаматериалов;
- структурную организацию и взаимосвязь между структурой и свойствами метаматериалов;
- зависимость оптических свойств металлических и полупроводниковых наночастиц от их размера, геометрии и состава;
- основные методы синтеза и поверхностной модификации металлических и полупроводниковых наночастиц с заданными морфологией и свойствами;
- особые оптические, акустические, механические и термические свойства метаматериалов и способы управления этими свойствами;
- методы получения и дизайна метаматериалов и гибридных материалов на их основе;
- области применения метаматериалов;

уметь:

- пользоваться научной и справочной литературой, посвященной метаматериалам;
- пользоваться научно-технической терминологией данной области знаний;
- проводить расчеты оптических свойств сферических наночастиц с плазмонными и диэлектрическими Ми-резонансами в соответствии с теорией Ми, используя специализированное программное обеспечение (Mie Plot, Mie Calculator), и грамотно трактовать полученные результаты;
- применять простейшие методы коллоидно-химического синтеза и самоорганизации для получения Ми-резонансных наночастиц и метаматериалов на их основе;
- обрабатывать экспериментальные данные, полученные в ходе исследования структурных и оптических свойств метаматериалов;
- представлять научные результаты, посвященные метаматериалам, в виде устного доклада, презентации, научной статьи;

иметь навыки:

- подготовки и представления устных научных докладов и презентаций по тематике, связанной с получением, свойствами и применением метаматериалов;
- написания письменных научных работ обзорного характера в области нанохимии и метаматериалов;

- обсуждения научных результатов по тематике, связанной с получением, свойствами и применением метаматериалов;
- критического анализа литературных и экспериментальных данных, связанных со структурными и физико-химическими свойствами метаматериалов.

Структура учебной дисциплины

Дисциплина изучается в 3 семестре. В соответствии с учебным планом всего на изучение учебной дисциплины «Метаматериалы» отведено для **очной формы** получения высшего образования – 90 часов, в том числе 36 аудиторных часов: лекции – 28 часов, семинарские занятия – 8 часов. **Из них:**

– лекции – 20 часов, семинарские занятия – 8 часов ДОТ, управляемая самостоятельная работа (УСР) – 2 часа + 6 часов ДОТ.

Трудоемкость учебной дисциплины составляет 3 зачетные единицы.

Форма промежуточной аттестации – зачет.

СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

Раздел 1 Введение. Метаматериалы как новая область науки и технологий

Тема 1.1 Проблемное поле науки о метаматериалах. Электромагнитные, акустические, механические и термические метаматериалы

Понятие о метаматериалах. Характеристические свойства метаматериалов. История развития науки о метаматериалах. Взаимосвязь науки о метаматериалах с другими науками. Метаматериалы в науке, технологиях и культуре. Классификация метаматериалов по наличию резонансного отклика. Понятие о резонансных и нерезонансных метаматериалах. Размерность и структура метаматериалов. Периодические и непериодические метаматериалы. Классификация метаматериалов по типу взаимодействующего поля.

Взаимодействие электромагнитного поля с материалами. Виды электромагнитного излучения. Модуляция показателя преломления и оптические свойства материала. Свойства электромагнитных метаматериалов. Фотонные кристаллы. Сравнительная характеристика электромагнитных метаматериалов и фотонных кристаллов. Виды электромагнитных метаматериалов и их свойства. «Леворукие» метаматериалы. Импедансные метаматериалы. Аннигиляционные метаматериалы. ENZ- и MNZ-метаматериалы. Уникальность свойств и проблемы, возникающие при создании оптических метаматериалов.

Физические и структурные свойства акустических и механических метаматериалов. Методы создания акустических и механических метаматериалов. Применения акустических и механических метаматериалов. Термические метаматериалы и управление тепловыми потоками. Структура и методы получения термических метаматериалов. Применения термических метаматериалов.

Раздел 2 Оптические свойства метамолекул и метаатомов

Тема 2.1 Взаимодействие оптического излучения с макроскопическими материалами

Оптические свойства материалов. Частотная зависимость функций диэлектрической и магнитной проницаемости для металлов и полупроводников. Физический смысл действительной и мнимой части функции диэлектрической проницаемости. Понятие об оптических диполях. Приближение дискретных оптических диполей. Взаимодействие света с макроскопическими полупроводниками. Теория Лоренца. Взаимодействие света с макроскопическими металлами. Теория Друде. Учет межзонных электронных переходов в теории Друде.

Тема 2.2 Рассеяние и поглощение света наночастицами (НЧ) металлов и полупроводников

Рассеяние света НЧ металлов и полупроводников. Условия геометрического рассеяния, рассеяния Ми и Рэлея. Теория Ми и ее роль в современном естествознании. Понятие о плазмонных резонансах. Диэлектрическая функция плазмонных материалов. Скин-эффект. Типы плазмонных мод и их классификация. Добротность плазмонного резонатора. Оптические потери. Локализованный поверхностный плазмон-поляритон. Условия возникновения локализованного поверхностного плазмонного резонанса (ЛППР). Зависимость плазмонных свойств НЧ от природы материала, размера, геометрии и полидисперсности НЧ и диэлектрических характеристик окружающей среды. Экстинкция плазмонных НЧ. Коллективные плазмонные эффекты. Причины уширения пиков ЛППР. Усиление локального электромагнитного поля плазмонами НЧ. Эффект Перселла. Условия появления диэлектрических Ми-резонансов. Оптические свойства НЧ с диэлектрическими Ми-резонансами. Оптический магнетизм. Сравнительная характеристика плазмонных и диэлектрических Ми-резонансов. Геометрические резонансы (WGM, резонансы Фабри-Перо). Общая характеристика геометрических резонансов. Применения микрочастиц и НЧ с геометрическими резонансами.

Раздел 3 Методы получения Ми-резонансных наночастиц

Тема 3.1 Диспергационные методы синтеза Ми-резонансных НЧ

Плазменное распыление. Фемтосекундная лазерная абляция. Химическое осаждение из паровой фазы. Коллоидная литография. Преимущества и недостатки диспергационных методов синтеза.

Тема 3.2 Коллоидно-химические методы синтеза Ми-резонансных НЧ

Химическое восстановление в водной и органических средах. Высокотемпературный синтез в органических средах. Полиольный процесс. Синтез в «обратных» мицеллах. Фотохимический синтез (с оптической и pH-модуляцией). Сонохимический синтез. Микроволновый синтез. Биосинтез. Общие принципы управления размером, формой и полидисперсностью наночастиц в ходе коллоидно-химического синтеза. Подходы к получению гетеронаноструктур. Преимущества и недостатки коллоидно-химических методов синтеза.

Раздел 4 Области применения Ми-резонансных наночастиц

Тема 4.1 Колориметрические сенсоры на основе Ми-резонансных НЧ. Эффекты плазмон-усиленной флуоресценции и плазмон-индуцированного тушения флуоресценции в биосенсорике. Ми-резонансные НЧ в спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния (ГКР)

Колориметрические сенсоры на основе плазмонных НЧ и их классификация. Природа изменения оптического отклика колориметрического плазмонного сенсора. Сенсоры, чувствительные к изменению локального показателя преломления среды. Сенсоры, чувствительные к агрегации

плазмонных НЧ. Сенсоры, чувствительные к размеру и форме плазмонных НЧ. Функционализация поверхности плазмонных НЧ для их использования в биосенсорике. Применение НЧ с диэлектрическими Ми-резонансами в колориметрических сенсорах. Чувствительность, пределы обнаружения, время отклика, селективность и другие характеристики колориметрических сенсоров на основе Ми-резонансных НЧ. Применения в биомедицинской диагностике.

Природа резонансного переноса энергии между оптическими диполями. Условия проявления плазмон-усиленной флуоресценции и плазмон-индуцированного тушения флуоресценции. Общая характеристика структуры сенсоров с эффектами плазмон-усиленной флуоресценции и плазмон-индуцированного тушения флуоресценции. Примеры применений таких сенсоров для определения ионов тяжелых металлов и биомолекул. Чувствительность, пределы обнаружения, время отклика, селективность и другие характеристики сенсоров с эффектами плазмон-усиленной флуоресценции и плазмон-индуцированного тушения флуоресценции. Применения в биомедицинской диагностике.

Резонансная и нерезонансная спектроскопия ГКР. Устройство спектрометра для ГКР-спектроскопии. Измерение ГКР-спектров на жидких образцах. Механизмы плазмонного усиления сигнала в спектроскопии ГКР. НЧ с диэлектрическими Ми-резонансами в ГКР-спектроскопии: проблемы и перспективы применения. Влияние морфологии Ми-резонансных НЧ и их взаимного расположения на фактор усиления сигнала в ГКР-спектроскопии. ГКР-биочипы. Использование ГКР-сенсоров для биовизуализации *in vivo*. Возможности современной ГКР-спектроскопии для биомедицинской диагностики.

Тема 4.2 Ми-резонансные НЧ для усиления фотокатализа. Применение Ми-резонансных НЧ в оптике, оптоэлектронике и фотовольтаике

Проблемы традиционного полупроводникового фотокатализа. Основные механизмы усиления фотокатализа плазмонными НЧ. Плазмон-индуцированный фототермический эффект. Усиление локального электромагнитного поля вблизи Ми-резонансных НЧ. Генерация «горячих» электронов и дырок в плазмонных НЧ. Усиление фотокатализа посредством эффекта резонансного переноса энергии. Эффекты усиления рассеяния в дальнем поле и динамического переноса заряда в Ми-резонансном фотокатализе. Управление селективностью Ми-резонансного фотокатализа.

Применение Ми-резонансных НЧ в фототермической терапии онкозаболеваний. Применение Ми-резонансных НЧ в оптических фильтрах и волноводах. Лазеры на основе Ми-резонансных НЧ. Ми-резонансные НЧ для солнечных батарей и фотовольтаических устройств. Безпигментное окрашивание.

Раздел 5 Структура, оптические свойства и методы получения полупроводниковых нанокристаллов

Тема 5.1 Квантово-размерный эффект в полупроводниковых нанокристаллах (НК). Основные принципы синтеза коллоидных полупроводниковых НК

Зависимость оптических свойств полупроводниковых НК от их размера. Природа квантово-размерного эффекта в полупроводниковых НК. Сравнение электронного строения молекул, полупроводниковых НК и макроскопических полупроводников. Дискретные оптические переходы в полупроводниковых НК. Спектры поглощения и фотолюминесценции полупроводниковых НК. История открытия квантово-размерного эффекта.

Коллоидный синтез полупроводниковых НК в водной среде. Стабилизация коллоидных полупроводниковых НК. Высокотемпературный синтез полупроводниковых НК в органических средах. Модель Ла Мера для описания процессов зародышеобразования и роста. Способы управления размером и формой полупроводниковых НК в ходе коллоидно-химического синтеза. Контроль неомогенного уширения полос фотолюминесценции полупроводниковых НК в ходе синтеза. Синтез полупроводниковых НК в поточных реакторах. Другие методы синтеза полупроводниковых НК.

Тема 5.2 Полупроводниковые НК анизотропной формы. Квантово-размерные полупроводниковые гетеронаноструктуры

Квантово-размерный эффект и геометрия полупроводникового НК. Анизотропные полупроводниковые нанокристаллы: методы получения и оптические свойства. Квантовые наностержни. Квантовые нанопроволоки. Квантовые тетраподы. Квантовые нанопластины.

Допированные полупроводниковые гетеро-НК: синтез и оптические свойства. Синтез гетеро-НК для повышения квантового выхода фотолюминесценции. Природа поверхностных дефектов в квантовых точках. Гетеро-НК типа «ядро-оболочка». Выбор материала оболочки и создание условий эпитаксиального роста. Ступенчатые и градиентные оболочки для полупроводниковых НК. Классификация гетеро-НК «ядро-оболочка» по типу оптического гетероперехода. Квантовые нанопластины типа «ядро-оболочка» и «ядро-крылья». Гетероструктуры типа «квантовая точка в квантовой нанопроволоке».

Раздел 6 Области применения полупроводниковых нанокристаллов

Тема 6.1 Полупроводниковые НК в дисплейных технологиях и источниках света. Фотовольтаические сенсоры и солнечные батареи на полупроводниковых НК. Флуоресцентные метки на основе полупроводниковых НК для биомедицины. Полупроводниковые НК в фотокатализе

Люминесцентные LED-дисплеи на квантовых точках (КТ). Светодиод белого света на КТ. Телевизор на люминесцентных НК. Электролюминесцентные структуры на КТ.

Фотовольтаические структуры на КТ. Полимер-неорганические фотовольтаические структуры. Солнечные батареи на КТ. Контроль электрической проводимости в ансамблях полупроводниковых НК. КТ в ячейке Гратцеля. Предел Шокли-Квиссера для солнечных батарей на КТ.

Принципы флуоресцентного иммуноанализа. Гидрофилизация поверхности полупроводниковых НК для биомедицинских применений. Сравнение меток на основе флуоресцентных красителей и КТ. Фотостабильность КТ. КТ для 3D флуоресцентной биовизуализации. Многоцветное маркирование клеток КТ. Двухфотонное возбуждение фотолюминесценции меток на основе КТ. Ферстеровский резонансный перенос энергии в биосенсорике на КТ.

Преимущества полупроводниковых НК в фотокатализе. Примеры фотокаталитических реакций с участием полупроводниковых НК.

Тема 6.2 Самоорганизованные микро- и наноструктуры на основе полупроводниковых НК. Полупроводниковые суперкристаллы

Самоорганизация квантовых НК и биомолекул для биовизуализации и создания источников поляризованного света. Гибридные плазмон-экситонные наноструктуры. Структуры типа «КТ в фотонной точке» и их применения. Методы получения, структура, свойства и применения суперкристаллов на основе полупроводниковых НК.

Раздел 7 Оптические метаматериалы. Метафотоника

Тема 7.1 Оптические метаматериалы: структура и свойства. Метафотоника

История открытия оптических метаматериалов. Описание свойств оптических метаматериалов с помощью функций диэлектрической и магнитной проницаемости. Плазмонные оптические метаматериалы. Структура и оптические свойства плазмонных метамолекул. Свойства метаматериалов с отрицательным показателем преломления. Линза Веселаго. Суперлинза Пендри. Устройства невидимости на основе оптических метаматериалов. Гиперболические метаматериалы. Диэлектрические оптические метаматериалы.

Интерференционное взаимодействие оптических мод в метаматериалах. Управление направленностью света с помощью метаматериалов. Эффект Керкера. Неизлучающие анапольные моды. Антиферромагнитное упорядочение. Связанные состояния в континууме (VIC). Добротность оптических метаматериалов. Усиление нелинейных оптических свойств в метаматериалах. Использование метаматериалов в спектроскопии ГКР и поверхностно-усиленного ИК-поглощения. Применение метафотонных антенн для усиления двухфотонного поглощения и генерации оптических гармоник. Усиление магнетооптического отклика на метаповерхности. Эффект Перселла в метаматериалах. Трансформационная метафотоника. Гибридные плазмон-диэлектрические метаматериалы.

Раздел 8 Методы получения и дизайн метаматериалов

Тема 8.1 Литографические методы создания и дизайна метаматериалов. Коллоидно-химический синтез и самосборка для создания и дизайна метаматериалов

Преимущества и недостатки литографических методов. Возможности и ограничения литографических методов при создании 3D-метаматериалов. Электронно-лучевая нанолитография. Ионно-лучевая нанолитография. Фотолитография. Оптическая нанопечать. Интерференционная литография. Интерференционная литография с фазовой маской. Двухфотонная лазерная литография. Нанопечатная литография.

Преимущества и недостатки стратегии «bottom-up» для создания метаматериалов. Коллоидная литография наносферами. Формирование «сверхрешеток» методами самосборки. Формирование метаоболочек. Темплатная самосборка. ДНК-оригами. Фотохимическое осаждение. Получение слоистых метаматериалов из полимерных пленок. Электростатическое осаждение их коллоидного раствора. Метод Ленгмюра-Блоджетт. Метод Ленгмюра-Шефера. Электрофоретическое осаждение. Методы создания 3D-метаматериалов. Перспективные направления развития методов получения и дизайна метаматериалов.

Раздел 9 Метаматериалы для фотокатализа, биосенсорики и биомедицины

Тема 9.1 Метаматериалы для сенсорики и биомедицины

Параметры отклика оптического сенсора на основе метаматериалов. Хиральные метаматериалы для хироптической спектроскопии. Характеристики хироптических метасенсоров. Гиперболические метаматериалы в сенсорики. Увеличение спектральной разрешающей способности метасенсоров с помощью Фано-резонансов. ENZ-метаматериалы для сенсорики. Газовые сенсоры на основе плазмонных метаматериалов. ГКР-сенсорика на метаповерхности. Поверхностно-усиленная ИК-спектроскопия на Ван-дер-Ваальсовских метаповерхностях.

Тема 9.2 Метаматериалы для фотокатализа

Индивидуальные и коллективные оптические резонансы метаматериалов в фотокатализе. Регулирование оптического диапазона фотокатализатора на основе метаматериалов. Метаматериалы и эффективная конверсия света в фотокатализе. Метаповерхности для усиления фотоэлектролиза воды. Фотокатализ на плазмонных метаповерхностях. Фотокатализ органических и неорганических реакций с помощью метаматериалов. Хиральные метаматериалы для хирального фотокатализа. Метаматериалы в концепции «Lab-on-chip»: совмещение фотокатализа и сенсорики. Q-BIC-метаматериалы в фотокатализе.

Раздел 10 Метаматериалы и информационные технологии

Тема 10.1 Метаматериалы и искусственный интеллект (ИИ)

Использование ИИ для прогнозирования структуры метаматериалов с заданными свойствами. ИИ и метаматериалы в сверхчувствительной биосенсорике без использования меток. Исследование динамических биохимических процессов с помощью метаматериалов и ИИ. Применение метафотонных устройств в технологиях ИИ. Искусственная нейросеть на основе метаматериалов. Метаматериалы для распознавания образов.

Тема 10.2 Метаматериалы и квантовая информатика

Кубит как носитель квантовой информации. Интерференция единичной частицы. Когерентная суперпозиция состояний. Проблема квантовой декогеренции. Генерация кубитов. Источники единичных фотонов на основе метаматериалов. Квантовая наноплазмоника. Диэлектрические метаматериалы для квантовой информатики.

Раздел 11 Метаматериалы – структура, свойства, применения

Тема 11.1 Обобщение знаний о структуре, свойствах и применениях метаматериалов

Современные подходы к созданию метаматериалов с различными функциональными свойствами. Современные области применения метаматериалов. Подведение итогов.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Очная (дневная) форма получения высшего образования с применением дистанционных образовательных технологий
(ДОТ)

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов					Количество часов УСР	Форма контроля
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия	Иное		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Введение. Метаматериалы как новая область науки и технологий							
1.1	Проблемное поле науки о метаматериалах. Электромагнитные, акустические, механические и термические метаматериалы	2					2 (ДОТ)	обсуждение, контрольная работа
2	Оптические свойства метамолекул и метаатомов							
2.1	Взаимодействие оптического излучения с макроскопическими материалами	1						устный опрос
2.2	Рассеяние и поглощение света наночастицами (НЧ) металлов и полупроводников	1					2 (ДОТ)	контрольная работа в форме творческого задания, отчет о выполнении творческого задания
3	Методы получения Ми-резонансных наночастиц							

3.1	Диспергационные методы синтеза Ми-резонансных НЧ	1						устный опрос
3.2	Коллоидно-химические методы синтеза Ми-резонансных НЧ	1						устный опрос
4	Области применения Ми-резонансных наночастиц							
4.1	Колориметрические сенсоры на основе Ми-резонансных НЧ. Эффекты плазмон-усиленной флуоресценции и плазмон-индуцированного тушения флуоресценции в биосенсорике. Ми-резонансные НЧ в спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния (ГКР)	1		1 (ДОТ)				презентация, обсуждение в онлайн формате
4.2	Ми-резонансные НЧ для усиления фотокатализа. Применение Ми-резонансных НЧ в оптике, оптоэлектронике и фотовольтаике	1		1 (ДОТ)				презентация, обсуждение в онлайн формате
5	Структура, оптические свойства и методы получения полупроводниковых нанокристаллов							
5.1	Квантово-размерный эффект в полупроводниковых нанокристаллах (НК). Основные принципы синтеза коллоидных полупроводниковых НК	1						устный опрос
5.2	Анизотропные полупроводниковые НК. Квантово-размерные полупроводниковые гетеронаноструктуры	1						устный опрос

6	Области применения полупроводниковых нанокристаллов							
6.1	Полупроводниковые НК в дисплейных технологиях и источниках света. Фотовольтаические сенсоры и солнечные батареи на полупроводниковых НК. Флуоресцентные метки на основе полупроводниковых НК для биомедицины. Полупроводниковые НК в фотокатализе	1		1 (ДОТ)				презентация, обсуждение в онлайн формате
6.2	Самоорганизованные микро- и наноструктуры на основе полупроводниковых НК. Полупроводниковые суперкристаллы	1		1 (ДОТ)				презентация, обсуждение в онлайн формате
7	Оптические метаматериалы. Метафотоника							
7.1	Оптические метаматериалы: структура и свойства. Метафотоника	2					2 (ДОТ)	контрольная работа
8	Методы получения и дизайн метаматериалов							
8.1	Литографические методы создания и дизайна метаматериалов. Коллоидно-химический синтез и самосборка для создания и дизайна метаматериалов	2		2 (ДОТ)				контрольная работа
9	Метаматериалы для фотокатализа, биосенсорики и биомедицины							
9.1	Метаматериалы для сенсорики и биомедицины	1		1 (ДОТ)				презентация, обсуждение в онлайн формате

9.2	Метаматериалы для фотокатализа	1		1 (ДОТ)				презентация, обсуждение в онлайн формате
10	Метаматериалы и информационные технологии							
10.1	Метаматериалы и искусственный интеллект (ИИ)	1						устный опрос
10.2	Метаматериалы и квантовая информатика	1						устный опрос
11	Метаматериалы – структура, свойства, применения							
11.1	Обобщение знаний о структуре, свойствах и применениях метаматериалов						2	устный доклад с презентацией, обсуждение в формате конференции
	Всего часов	20		8			8	

ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Основная литература

1. Гольдаде, В.А. Физика твердого тела: учебное пособие для студентов учреждений высшего образования: в 2 ч. / В. А. Гольдаде, А. В. Семченко, С. А. Хахомов. – Минск : РИВШ, 2023. – Ч. 2. – 2023. – 235 с.
2. Воронов, В.К. Физика на переломе тысячелетий. Новые разделы физики нано- и мегамира: учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по техническим направлениям подготовки и естественно-научным специальностям: [в 2 ч.] / В. К. Воронов, А. В. Подоплелов, Р. З. Сагдеев. – Старый Оскол : ТНТ, 2021. – Ч. 1. – 2021. – 355 с.
3. Щука, А.А. Нанoeлектроника: учебник для вузов, для студ., обуч. по инженерно-техническим направлениям / А. А. Щука; под общ. ред. А.С. Сигова. – Москва : Юрайт, 2024. – 297 с.

Дополнительная литература

1. Сергеева, О.В. Введение в нанохимию / О. В. Сергеева, С. К. Рахманов. – Пособие для студентов хим. фак. — Минск : БГУ, 2009. — 176 с.
2. Артемьев, М. В. Новые неорганические соединения и материалы на основе микро- и наноразмерных частиц: получение свойства, применение / М. В. Артемьев, А. И. Лесникович, О. А. Ивашкевич. – Минск : БГУ, 2015. – 151 с.
3. Gaponenko, S.V. Introduction to nanophotonics / S. V. Gaponenko. – New York ; Oxford : Oxford Univ. Press, 2010. – 465 p.
4. Hyperbolic metamaterials based on quantum-dot plasmon-resonator nanocomposites / S. V. Zhukovsky [et al.] // Optics Express – 2014. – Vol. 22, № 15. – P. 18290–18298.
5. Malakhovsky, P. Determination of pseudo-refractive index in self-assembled ligand layers from spectral shift of surface plasmon resonances in colloidal silver nanoplates / P. Malakhovsky, D. Murausky // Z. Phys. Chem. – 2021. – Vol. 235, № 12. – P. 1831–1848.
6. Electrostatic deposition kinetics of colloidal silver nanoplates onto optically and e-beam transparent water-insoluble polycationic films / P. Malakhovsky [et al.] // J. Phys. Chem. C. – 2021. – Vol. 125, № 32. – P. 17870 - 17880.
7. Murausky, D. Hybrid layers of laterally oriented plasmon silver nanoplates and luminescent quantum dots with resonance energy transfer / D. Murausky, P. Malakhovsky, M. Artemyev // J. Appl. Spectr. – 2024. – Vol. 91, № 3. – P. 575–581.
8. Борен, К. Поглощение и рассеяние света малыми частицами / К. Борен, Д. Хафмен / Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 664 с.
9. Сарычев, А.К. Электродинамика метаматериалов / А. К. Сарычев, В. М. Шалаев / Пер. с англ. В. Г. Аракчеева, Ю. В. Владимировой, науч. ред. В. Н. Задков. – М.: Научный мир, 2011. – 224 с. – (Фундаментальные основы нанотехнологий: лучшие зарубежные учебники).

10. Поверхностно-усиленная рамановская спектроскопия (SERS): аналитические, биофизические и биомедицинские приложения / ред. С. Шлюкер. – М.: Техносфера, 2017. – 332 с.
11. Bouwmeester, D. The physics of quantum information / D. Bouwmeester, A. Ekert, A. Zeilinger. – London : Springer, 2000. – 315 p.
12. Metamaterials: theory, design and applications / T. J. Cui [et al.]. – London : Springer, 2010. – 367 p.
13. Quinten, M. Optical properties of nanoparticle systems: Mie and beyond / M. Quinten. – Weinheim : WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2011. – 488 p.
14. Light trapping for solar fuel generation with Mie resonances / S. J. Kim [et al.] // Nano Lett. – 2014. – Vol. 14, № 3. – P. 1446–1452.
15. Metaphotonics: an emerging field with opportunities and challenges / A. Baev [et al.] // Phys. Rep. – 2015. Vol. 594. – P. 1–60.
16. Kruk, S. Functional meta-optics and nanophotonics governed by Mie-resonances / S. Kruk, Y. Kivshar // ACS Photonics – 2017. – Vol. 4, № 11. – P. 2638–2649.
17. Generation of hot electrons with chiral metamaterial perfect absorbers: giant optical chirality for polarization-sensitive photochemistry / W. Wang [et al.] // ACS Photonics – 2019. – Vol. 6, № 12. – P. 3241–3252.
18. Present and future of surface-enhanced Raman scattering / J. Langer [et al.] // ACS Nano. 2020 – Vol. 14, № 1. – P. 28–117.
19. Nair, A. B. Formation of selenium superstructures: self-assembly of monodispersed sub-micron spheres and nanorods / A. B. Nair, M. Puthor, G. G. Nair // Appl. Surf. Sci. – 2020. – Vol. 513, № 145862. – P. 1–6.
20. Challenges in plasmonic catalysis / E. Cortes [et al.] // ACS Nano. – 2020. – Vol. 14, № 12. – P. 16202–16219.
21. Abouelela, M. M. A review on plasmonic nanoparticle-semiconductor photocatalysts for water splitting / M. M. Abouelela, G. Kawamura, A. Matsuda // J. Clean. Prod. – 2021. – Vol. 294, № 126200. – P. 1–17.
22. Surface functionalization and texturing of optical metasurfaces for sensing applications / B. I. Karawdeniya [et al.] // Chem. Rev. – 2022. – Vol. 122, № 19. – P. 14990–15030.
23. Molecular plasmonics with metamaterials / P. Wang [et al.] // Chem. Rev. – 2022. – Vol. 122, № 19. – P. 15031–15081.
24. Optical metasurfaces for energy conversion / E. Cortes [et al.] // Chem. Rev. – 2022. – Vol. 122, № 19. – P. 15082–15176.
25. Light–matter interactions in hybrid material metasurfaces / J. Guan [et al.] // Chem. Rev. – 2022. – Vol. 122, № 19. – P. 15177–15203.
26. Engineering van der Waals materials for advanced metaphotonics / H. Lin [et al.] // Chem. Rev. – 2022. – Vol. 122, № 19. – P. 15204–15355.
27. Artificial intelligence in meta-optics / M. K. Chen [et al.] // Chem. Rev. – 2022. – Vol. 122, № 19. – P. 15356–15413.
28. Multifunctional and transformative metaphotonics with emerging materials / P. Tonkaev [et al.] // Chem. Rev. – 2022. – Vol. 122, № 19. – P. 15414–15449.

29. Enabling active nanotechnologies by phase transition: from electronics, photonics to thermotics / C. Zheng [et al.] // Chem. Rev. – 2022. – Vol. 122, № 19. – P. 15450–15500.
30. Recent advances in tunable metasurfaces: materials, design, and applications / O. A. M. Abdelraouf [et al.] // ACS Nano. – 2022. – Vol. 16, № 9. – P. 13339–13369.
31. Structure-property-performance relationships of cuprous oxide nanostructures for dielectric Mie resonance-enhanced photocatalysis / R. T. A. Tirumala [et al.] // ACS Catalysis. – 2022. – Vol. 12, № 13. – P. 7975–7985.
32. Amirjani, A. Plasmon-enhanced photocatalysis based on plasmonic nanoparticles for energy and environmental solutions: a review / A. Amirjani, N. B. Amlashi, Z. S. Ahmadiani // ACS Appl. Nano Mater. – 2023. – Vol. 6, № 11. – P. 9085–9123.
33. Synergy effect of plasmonic field enhancement and light confinement in mesoporous titania-coated aluminum nanovoid photoelectrode / G. Kawamura [et al.] // J. Phys. Chem. Lett. – 2023. – Vol. 14, № 51. – P. 11691–11696.
34. Lyu, P. Photocatalysis of metallic nanoparticles: interband vs intraband induced mechanisms / P. Lyu, R. Espinoza, S. C. Nguyen // J. Phys. Chem. C. – 2023. – Vol. 127, № 32. – P. 15685–15698.
35. Mie resonant metal oxide nanospheres for broadband photocatalytic enhancements / M. Hershey [et al.] // ACS Nano. – 2024. – Vol. 18, № 28. – P. 18493–18502.
36. Flexible metasurfaces for multifunctional interfaces / Y. Zhou [et al.] // ACS Nano. – 2024. – Vol. 4, № 19. – P. 2685–2707.
37. Saitow, K. 1D, 2D and 3D mapping of plasmon and Mie resonances: a review of field enhancement imaging based on electron or photon spectromicroscopy / K. Saitow // J. Phys. Chem. C. – 2024. – Vol. 128, № 13. – P. 5367–5393.
38. A quasi-bound states in the continuum dielectric metasurface-based antenna–reactor photocatalyst / L. Yuan [et al.] // Nano Lett. – 2024. – Vol. 24, № 1. – P. 172–179.

Перечень рекомендуемых средств диагностики и методика формирования итоговой отметки

Объектом диагностики компетенций студентов являются знания, умения, полученные ими в результате изучения учебной дисциплины. Выявление учебных достижений студентов осуществляется с помощью мероприятий текущей и промежуточной аттестации.

Для диагностики компетенций могут использоваться следующие средства текущей аттестации: контрольная работа; устный опрос, обсуждение на аудиторных занятиях; отчет о выполнении творческого задания, презентация с обсуждением в онлайн формате, сдача зачета по учебной дисциплине.

Формой промежуточной аттестации по дисциплине «Метаматериалы» учебным планом предусмотрен зачет.

Примерный перечень заданий для управляемой самостоятельной работы

Тема 1.1 Проблемное поле науки о метаматериалах. Электромагнитные, акустические, механические и термические метаматериалы (2 ч ДОТ)

Контрольная работа «Роль метаматериалов в современном материаловедении»

Примеры заданий контрольной работы:

1. Сформулируйте свое определение, которое наиболее точно характеризует термин «метаматериалы». Предположите, с чем связано отсутствие единого определения?

2. Какие свойства присущи метаматериалам? Поясните, каким образом удается достичь проявления уникальных свойств в метаматериалах, если для их создания используются известные в природе материалы.

3. Отнесение фотонных кристаллов к метаматериалам – спорный вопрос. Проанализируйте доводы «за» и «против» рассмотрения фотонных кристаллов как метаматериалов.

4. Классифицируйте метаматериалы по типу взаимодействия с внешними полями. Почему наибольший научный и практический интерес уделяется электромагнитным метаматериалам? Что понимают под термином «резонансные метаматериалы»?

5. Каковы критерии отнесения метаматериалов к электромагнитным? Какие метаматериалы называют «леворучными», «импедансными», «анигилятивными»? Предположите, в каких применениях могут использоваться эти материалы.

6. Проанализируйте научную литературу по сферам применения электромагнитных, акустических, механических и термических метаматериалов. На основе выбранной вами статьи сделайте краткий обзор (5-10 предложений + 1-3 картинки из статьи) об одной из областей применений таких метаматериалов. В конце обзора оформите ссылку на статью по требованиям ВАК Беларуси.

(Форма контроля – контрольная работа на образовательном портале).

Тема 2.2 Рассеяние и поглощение света наночастицами (НЧ) металлов и полупроводников (2 ч ДОТ)

Контрольная работа в форме творческого задания «Плазмонные и диэлектрические Ми-резонансы»

Описание творческого задания:

Цель задания: с помощью программного обеспечения MiePlot изучить некоторые оптические свойства сферических наночастиц с плазмонными или диэлектрическими Ми-резонансами. Объекты изучения: наночастицы с плазмонными (серебра, золота, меди, алюминия, платины и др.) и диэлектрическими (кремния, диоксида кремния, диоксида титана, селена, теллура и др.) Ми-резонансами. К заданию прилагается инструкция по работе с программой MiePlot. Теоретические основы алгоритма расчета обсуждаются в лекционном курсе. Пример творческого задания:

1. Изучение влияние локального показателя преломления на оптические свойства наночастиц серебра. Рассчитайте оптические сечения монодисперсных наночастиц серебра с диаметром 30 нм. В качестве окружающей среды рассмотрите воздух (Air), воду (Water) и стекло (Fixed Refractive index (medium) = 1.5).

А) На одном графике постройте спектральные зависимости сечения экстинкции наночастиц серебра (30 нм) для разных окружающих сред.

Б) Сделайте вывод о наблюдаемых спектральных эффектах при изменении показателя преломления окружающей среды.

2. Изучение зависимости оптических свойств наночастиц серебра от размера наночастиц. Рассчитайте оптические сечения монодисперсных наночастиц серебра с диаметром 10, 50 и 100 нм, диспергированных в воде при температуре 25 °С. Обратите внимание, размер частиц указывается в микронах.

А) Постройте 3 графика зависимости оптических сечений от длины волны для наночастиц серебра трех размеров.

Б) Для каждого размера наночастиц серебра рассчитайте процентный вклад рассеяния и поглощения в экстинкцию этих наночастиц как соотношение площади под спектром рассеяния (поглощения) к площади под спектром экстинкции. Величины площадей определите с помощью функции Analysis → Mathematics → Integrate.

В) На одном графике постройте зависимости вклада рассеяния и вклада поглощения от размера наночастиц серебра. Сравните полученные зависимости и сделайте вывод о том, как меняются вклады рассеяния и поглощения в экстинкцию при увеличении размера плазмонных наночастиц.

3. Изучение неоднородного уширения пиков плазмонного резонанса наночастиц серебра. Рассчитайте оптические сечения полидисперсных наночастиц серебра диаметром 20 нм с нормальным распределением по размеру для величины разброса 1 и 30% (Particle size → Disperse → LogNormal → Std. Dev.=1% (30%), N=5). Дисперсионная среда – вода при температуре 25 °С.

А) Нормируйте на единицу и постройте спектры сечения экстинкции для наночастиц серебра (20 нм) с разной степенью дисперсности на одном графике.

Б) Определите ширину плазмонных пиков на половине максимума для обоих спектров. Сделайте вывод о влиянии полидисперсности плазмонных наночастиц на спектральную ширину плазмонного пика.

4. Сравнение оптических свойств наночастиц серебра и золота одинакового размера. Рассчитайте оптические сечения монодисперсных наночастиц серебра и золота с диаметром 20 нм. Дисперсионная среда – вода при температуре 25 °С.

А) Учитывая, что эффективность рассеяния Q_{ext} является отношением сечения рассеяния C_{sca} к геометрическому сечению наночастицы, постройте на одном графике зависимости эффективности рассеяния от длины волны для наночастиц серебра и золота размером 20 нм.

Б) Проанализируйте полученные зависимости. Предположите, почему наночастицы золота уступают наночастицам серебра того же размера в эффективности рассеяния.

(Форма контроля – отчет о выполнении творческого задания).

Тема 7.1 Оптические метаматериалы: структура и свойства. Метафотоника (2 ч ДОТ)

Контрольная работа «Оптика метаматериалов»

Примеры заданий контрольной работы:

1. Соотнесите фамилии ученых с их открытиями:

	Ученый		Открытие
1	В. Веселаго	А	Первая публикация о средах, в которых фазовая скорость света и вектор Пойнтинга разнонаправленны
2	Дж. Нейманн, Е. Вигнер	Б	Теоретическое обоснование плазмонной суперлинзы
3	Дж. Пендри	В	Введение термина «метаматериалы» в научную литературу
4	Ф. Капассо	Г	Создание первого плазмонного метаматериала, работающего в радиодиапазоне
5	Л. Мандельштам	Д	Разработка электродинамики «леворуких» метаматериалов
6	Д. Смит	Е	Открытие эффекта связанных состояний в континууме в реальных оптически активных материалах
7	Р. Уолсер	Ж	Теория связанных состояний в континууме

2. Почему материалы с отрицательным эффективным показателем преломления называют «леворукими»? Какие метаатомы используются для построения плазмонных и диэлектрических метаматериалов? Поясните, каким образом отрицательный показатель преломления возникает в плазмонных и диэлектрических метаматериалах.

3. Какие необычные оптические свойства проявляются в метаматериалах с отрицательным показателем преломления?

4. Каким образом суперлинзы позволяют преодолеть дифракционный предел? Каковы их недостатки?

5. Сформулируйте принципы, лежащие в основе создания материалов для трансформационной метафотоники.

6. Какие метаматериалы относят к гиперболическим? Каковы области их применения?

7. Какие оптические свойства возникают в метаматериалах за счет эффекта интерференции Ми-резонансов? Кратко опишите эти свойства и их применение на практике.

8. В 2022 году развитие представлений о диэлектрических метаматериалах и метафотонике было названо «началом эры Ми-троники». Ознакомьтесь с приложенной к заданию статьей (Nano Lett. 2022, 22, 3513–3515) и попробуйте сформулировать, почему этой области знаний уделяется столь большое внимание.

(Форма контроля – контрольная работа на образовательном портале).

Тема 11.1 Обобщение знаний о структуре, свойствах и применениях метаматериалов (2 ч)

Представление устного доклада с презентацией в рамках конференции по общей тематике «Метаматериалы: структура, свойства и применения». Конкретная тематика доклада определяется студентом самостоятельно при согласовании с преподавателем, исходя из научных интересов студента.

(Форма контроля – устный доклад с презентацией, обсуждение в формате конференции).

Примерная тематика семинарских занятий

1. Области применения Ми-резонансных наночастиц
2. Области применения полупроводниковых нанокристаллов
3. Метаматериалы для фотокатализа, биосенсорики и биомедицины
4. Метаматериалы – структура, свойства, применения

Описание инновационных подходов и методов к преподаванию учебной дисциплины

Преподавание учебной дисциплины «Метаматериалы» включает в себя проведение аудиторных занятий (лекции) и занятий с применением дистанционных образовательных технологий (семинарские занятия и управляемая самостоятельная работа студентов). Самостоятельная работа вне аудитории предполагает работу с учебной и научной литературой, выполнение домашних заданий, работу на образовательном портале БГУ, подготовку к занятиям. Относительно малый размер учебной группы и наличие определенных знаний у обучающихся по дисциплинам смежных тематик позволяет эффективно сочетать индивидуальный и групповой подход во взаимодействии «преподаватель-студенты», в том числе, на лекционных занятиях.

Организация учебного процесса по дисциплине предусматривает использование ряда **инновационных подходов (эвристического, практико-ориентированного, обучающе-исследовательского) и методов (анализ конкретных ситуаций (кейс-метод), учебная дискуссия, развитие критического мышления, групповое обучение и деловая игра).**

Применение **эвристического подхода** в ходе семинарских занятий и управляемой самостоятельной работы побуждает студентов к активному участию в образовательном процессе, что выражается в критическом осмыслении изучаемых проблем и формировании собственного профессионального мнения о них. В рамках **практико-ориентированного и обучающе-исследовательского** подхода построены лекционные занятия, на которых изучаемые вопросы рассматриваются на примере реальных научно-исследовательских задач, и самостоятельная работа студентов, включающая в себя анализ конкретных проблемных ситуаций и поиск путей их решения (**кейс-**

метод). Использование **метода учебной дискуссии** в образовательном процессе способствует эффективному освоению терминологией курса, развитию коммуникативных навыков, навыков представления научно-технических результатов. Анализ учебной и научной литература, подготовка научных обзоров и обсуждение изучаемых вопросов обеспечивает **развитие критического мышления** обучающихся. Формирование профессиональных компетенций, таких как умение работать в коллективе и научная коммуникация, осуществляется путем внедрения в учебный процесс **методов группового обучения и элементов деловой игры.**

Методические рекомендации по организации самостоятельной работы

Для организации самостоятельной работы необходимо наличие методических указаний, электронных учебно-методических комплексов, в том числе представленных на образовательном портале, фондов оценочных средств, конкретных электронных информационных ресурсов, исходя из специфики организации самостоятельной работы по учебной дисциплине.

В процессе организации самостоятельной работы студентов используются методы дистанционных образовательных технологий, ориентированные на активное вовлечение студентов в учебный процесс. При этом традиционные методы обучения (подготовка выступления, работа с текстами, выполнение заданий с консультациями преподавателя) комбинируются с инновационными подходами (учебно-научная дискуссия, подготовка и представление презентации в группе, организация и проведение учебно-научной конференции, анализ реальной научно-исследовательской проблемы и поиск путей ее решения, творческое задание). Задания УСР по учебной дисциплине составляются с учетом индивидуальной подготовки студентов и могут быть представлены на разном уровне: от заданий, формирующих знания по изученному учебному материалу на уровне узнавания, к заданиям, формирующим компетенции на уровне воспроизведения, и далее к заданиям, формирующим компетенции на уровне применения полученных знаний.

Внеаудиторная работа предполагает самостоятельную работу с учебными пособиями, материалами публикаций по изучаемым темам учебной дисциплины, а также подготовку к практическим занятиям. Учебно-программные материалы, материалы для самостоятельного освоения учебного материала, список рекомендуемой литературы размещены в сетевом доступе на образовательном портале educhem.bsu.by. При выполнении заданий требуется также осуществлять поиск и критический анализ информации в сети Интернет.

Примерный перечень вопросов к зачету

1. Проблемное поле науки о метаматериалах и ее место среди других наук
2. Классификация метаматериалов. Понятие о резонансных и нерезонансных метаматериалах
3. Акустические и механические метаматериалы: свойства и применение
4. Термические метаматериалы: свойства и применение

5. Общая характеристика электромагнитных метаматериалов. Фотонные кристаллы
6. Взаимодействие света с объемными полупроводниками и металлами. Теория Лоренца-Друде
7. Рассеяние и поглощение света наночастицами металлов и полупроводников. Теория Ми
8. Классификация плазмонных резонансов. Оптические свойства наночастиц, обусловленные локализованным поверхностным плазмонным резонансом
9. Оптические свойства наночастиц, обусловленные диэлектрическими Ми-резонансами. Сравнительная характеристика плазмонных и диэлектрических Ми-резонансов
10. Оптические свойства и применения материалов с геометрическими оптическими резонансами
11. Диспергационные методы синтеза Ми-резонансных наночастиц. Методы плазменного распыления и лазерной абляции
12. Диспергационные методы синтеза Ми-резонансных наночастиц. Методы химического осаждения из паровой фазы и коллоидной литографии
13. Коллоидно-химические методы синтеза Ми-резонансных наночастиц. Химическое восстановление в водной фазе. Синтез в «обратных мицеллах». Биосинтез
14. Коллоидно-химические методы синтеза Ми-резонансных наночастиц. Высокотемпературный синтез в органических средах. Фотохимический синтез
15. Коллоидно-химические методы синтеза Ми-резонансных наночастиц. Сонохимический синтез. Микроволновой синтез
16. Классификация и характеристика колориметрических сенсоров на основе Ми-резонансных наноструктур
17. Ми-резонансные наночастицы в спектроскопии ГКР. Преимущества и недостатки плазмонных субстратов для спектроскопии ГКР
18. Механизмы усиления фотокатализа Ми-резонансными наночастицами. Управление селективностью фотокатализа
19. Применение Ми-резонансов в оптике, оптоэлектронике и фотовольтаике
20. Плазмонные наночастицы в фототермической терапии онкозаболеваний
21. Природа эффекта размерного квантования и уникальные оптические свойства полупроводниковых нанокристаллов
22. Основные принципы химического синтеза коллоидных полупроводниковых нанокристаллов
23. Параметры, определяющие размер и форму полупроводниковых нанокристаллов в процессе синтеза
24. Структурные и оптические свойства гетерогенных полупроводниковых нанокристаллов
25. Полупроводниковые нанокристаллы для дисплейных технологий и источников света

26. Фотовольтаические сенсоры на основе полупроводниковых нанокристаллов
27. Применение полупроводниковых нанокристаллов в солнечных батареях
28. Полупроводниковые нанокристаллы как флуоресцентные метки для биомедицины
29. Гибридные оптически активные материалы на основе полупроводниковых нанокристаллов
30. Метафотоника. Оптический магнетизм в метаматериалах
31. «Леворукие» метаматериалы. Реализация отрицательного показателя преломления в метаматериалах
32. Преодоление дифракционного предела с помощью метаматериалов. Суперлинза Пендри. Гиперлинза
33. Интерференция Ми-резонансов в метаматериалах. Эффект Керкера. Применение метаматериалов с неизлучающими оптическими модами
34. Усиление фотолюминесценции с помощью оптической «метаантенны». Эффект Перселла
35. Сравнительная характеристика литографических и коллоидно-химических методов создания метаматериалов
36. Создание метаматериалов. Электронно-лучевая и ионно-лучевая литография. «Перьевая» и коллоидная литография
37. Создание метаматериалов. Фотолитография. Интерференционная литография. Двухфотонная лазерная литография. Оптическая нанопечать
38. Методы темплатной самосборки и фотохимического осаждения для получения метаматериалов
39. Методы Ленгмюра-Блоджетт (Ленгмюра-Шефера), электрофоретического и электростатического осаждения для получения метаматериалов
40. Хиральные метаматериалы в биосенсорике
41. Гиперболические метаматериалы. Использование гиперболических метаматериалов в сенсорике и метафотонике
42. Связанные состояния в континууме. Q-VIS-метаматериалы в сенсорике и фотокатализе
43. Трансформационная метафотоника и ее применения. Возможности метаматериалов для управления светом
44. ENZ-метаматериалы: структура, свойства и применения
45. Применения метаматериалов в информационных технологиях. Метаматериалы и квантовая информатика
46. Перспективы развития науки и технологии метаматериалов

ПРОТОКОЛ СОГЛАСОВАНИЯ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ УО

Название учебной дисциплины, с которой требуется согласование	Название кафедры	Предложения об изменениях в содержании учебной программы учреждения высшего образования по учебной дисциплине	Решение, принятое кафедрой, разработавшей учебную программу (с указанием даты и номера протокола)
Электро- и фотолуминесцентные системы	Кафедра неорганической химии	Предложения отсутствуют	Рекомендовать к утверждению учебную программу (протокол № 10 от 06.06.2025)

Заведующий кафедрой неорганической химии
 член-корреспондент НАН Беларуси
 доктор химических наук, профессор



Д.В.Свиридов

06.06.2025

ДОПОЛНЕНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ К УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЕ УО

на ____ / ____ учебный год

№ п/п	Дополнения и изменения	Основание

Учебная программа пересмотрена и одобрена на заседании кафедры
_____ (протокол № ____ от _____ 202_ г.)

Заведующий кафедрой

УТВЕРЖДАЮ
Декан факультета
