

Методические материалы по выполнению лабораторной работы по дисциплине
“Введение в системы беспроводной связи”.

Лабораторная работа: **"Анализ модели многолучевого канала с Доплеровским рассеянием"**

Цель работы:

Реализация модели канала с Доплеровским рассеянием без частотной селективности.

Исследование алгоритмов оценки канала на основе разработанной модели.

Теоретическое введение

В этом разделе студентам рекомендуется провести анализ следующих вопросов:

1. Возникновение Доплеровского рассеяния: описание, возникновение.
2. Интерференция сигналов .
3. Автокорреляционные функции.
4. Экстраполяция канала.

Оборудование

1. Персональный компьютер (ноутбук) с установленной средой разработки на языке Python (>3.8).

Выполнение работы

1. Реализовать на языке Python модель Джейкса в предположении отсутствия линии прямой видимости и средней энергии принимаемого сигнала, равной единице.
2. Убедиться, что для небольшого количества моделируемых путей распространения сигнала (до 10), автокорреляционная функция коэффициента ослабления сигнала в канале достаточно точно приближается функцией Бесселя.
3. Реализовать алгоритмы оценки состояния канала. Убедиться, что точность оценки будет снижаться с ростом интервала времени с момента последнего наблюдения.
4. Провести анализ точности измерений и вычислений.
5. Отчет по выполненной работе, включая исходные данные, анализ результатов и выводы, должен быть загружен в LMS Canvas.

Экспериментальные результаты

- таблицы: оценка частоты Доплера по принятым опорным сигналам для различных параметров модели Джейкса;
- графики: зависимость точности оценки канала от отношения сигнал-шум в беспроводном канале;
- описание: качественная оценка влияния доплеровского рассеяния на автокорреляционную функцию, качественное влияние наличия линии прямой видимости на доплеровское рассеяние;

- расчеты: численная оценка изменения автокорреляционной функции с уменьшением диапазона возможных углов прихода сигнала;
- отчет по выполненной работе.

Выводы

Выводы по проделанной работе должны быть основаны на анализе полученных экспериментальных результатов и их сопоставлении с сформулированными в начале работы целью и задачами.

Контрольные вопросы

1. Как эффект Доплера влияет на принимаемый сигнал в условиях многолучевого распространения?
2. Что представляет собой автокорреляционная функция и какое значение она имеет при оценке состояния канала?
3. Почему важно учитывать доплеровское рассеяние при проектировании беспроводных систем?

Литература

1. David Tse and Pramod Viswanath. 2005. Fundamentals of wireless communication. Cambridge University Press, USA.

Методические материалы по выполнению лабораторной работы по дисциплине
“Прикладная физика биомиметических структур”.

Лабораторная работа: **“Исследование оптических свойств фантомов
биологических тканей”**

Цель работы:

Изготовить или исследовать набор фантомов, имитирующих оптические свойства биологических тканей, и определить влияние их структуры и состава на прохождение света. Получить количественные характеристики ослабления оптического излучения и сопоставить результаты с принципами биомиметического моделирования биологических объектов.

Теоретическое введение

Оптические свойства биологических тканей определяются главным образом поглощением и рассеянием света. Поглощение связано с преобразованием энергии излучения в другие формы энергии, а рассеяние возникает из-за пространственной неоднородности показателя преломления и наличия структур с размерами, сопоставимыми с длиной волны. Совместное действие этих процессов определяет глубину проникновения света в ткань и контраст оптических методов визуализации и диагностики.

Фантомы биологических тканей представляют собой искусственные образцы с контролируемым составом и геометрией, которые воспроизводят отдельные функциональные свойства реальных тканей. В рамках данной лабораторной работы биомиметический подход состоит в воспроизведении оптического отклика биологической ткани с помощью модельного материала, параметры которого можно целенаправленно изменять.

Для количественного анализа используются коэффициент пропускания $T = I/I_0$ и оптическая плотность $A = -\log_{10}(T)$, где I_0 — интенсивность падающего излучения, а I — интенсивность после прохождения через образец. Для сравнительной оценки ослабления света в фантомах одинаковой геометрии может быть рассчитан эффективный коэффициент ослабления $\mu_{\text{eff}} = -(1/L) \cdot \ln(T)$, где L — толщина образца.

Оборудование

1. Набор готовых фантомов биологических тканей или материалы для их изготовления, предоставленные преподавателем.
2. Стандартное лабораторное оборудование для подготовки образцов: лабораторные ёмкости, дозирующие устройства, весы, формы или кюветы.
3. Источник оптического излучения и система регистрации интенсивности света; при проведении работы в Лаборатории биофотоники может использоваться доступная оптическая измерительная или визуализационная система.
4. Средство измерения толщины образца.
5. Персональный компьютер для обработки результатов и подготовки отчёта.

Выполнение работы

Идентификатор документа, задачи / ID: 479422 v.1, 450405



ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ПРОСТОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ /
The document is signed with a simple electronic signature

Директор образовательной программы / The Director of the program
Дорожкин Павел Сергеевич / Dorozhkin Pavel Sergeevich

Дата подписания / Date of signing 22.09.2026

1. Ознакомиться с составом исследуемых фантомов. Зафиксировать для каждого образца его состав, толщину и отличия от других образцов.
2. Выполнить референсное измерение интенсивности I_0 без исследуемого фантома при выбранной длине волны или наборе спектральных каналов.
3. Установить первый фантом в измерительную схему и зарегистрировать интенсивность прошедшего излучения I . Повторить измерение не менее трёх раз.
4. Повторить измерения для остальных фантомов, сохраняя одинаковую геометрию и параметры регистрации.
5. Для каждого образца рассчитать коэффициент пропускания T , оптическую плотность A и, при известной толщине образца, эффективный коэффициент ослабления μ_{eff} .
6. Построить графики зависимости полученных оптических характеристик от состава образца и/или длины волны. Оценить, какие изменения состава приводят к наиболее заметному изменению оптического отклика.
7. Сопоставить экспериментальные результаты с физическими механизмами поглощения и рассеяния и объяснить, каким образом исследуемые фантомы воспроизводят свойства биологических тканей.
8. Подготовить отчёт по лабораторной работе. Отчёт должен содержать разделы: Введение, Материалы и методы, Результаты и обсуждение, Выводы и Список литературы.

Экспериментальные результаты

- Таблица с параметрами образцов и результатами измерений: толщина, I_0 , I , T , A и μ_{eff} .
- Графики зависимости пропускания или эффективного коэффициента ослабления от состава фантома и/или длины волны.
- Оценка повторяемости измерений по серии повторных измерений.
- Обсуждение вклада поглощения и рассеяния в наблюдаемое ослабление света.
- Краткое описание связи полученных результатов с практическим использованием тканевых фантомов в биофотонике, оптической визуализации и диагностике.

Выводы

Выводы должны быть основаны на анализе полученных экспериментальных данных и их сопоставлении с целью работы. Необходимо указать, как состав и структура фантома влияют на его оптический отклик, какие физические процессы определяют наблюдаемые различия и насколько исследованные образцы пригодны для воспроизведения оптического поведения биологических тканей.

Контрольные вопросы

1. Какие физические процессы определяют ослабление света в биологических тканях?
2. Для чего в биофотонике используются фантомы биологических тканей?
3. Как определяется коэффициент пропускания и чем он отличается от оптической плотности?
4. Как изменение концентрации поглощающего или рассеивающего компонента должно повлиять на регистрируемый сигнал?
5. Почему при сравнении разных фантомов необходимо контролировать толщину образца и геометрию измерения?
6. В чём состоит биомиметический принцип данной лабораторной работы?

Литература

1. B. Bhushan. Biomimetics: Bioinspired Hierarchical-Structured Surfaces for Green Science and Technology. Springer, 2018. ISBN 978-3-319-71676-3.
2. O. Karthaus. Biomimetics in Photonics. Taylor & Francis Group, 2013. ISBN 978-1-4398-7747-0.

Методические материалы по выполнению лабораторной работы по дисциплине
“Введение в оптические биосенсоры”.

Лабораторная работа: **“Размерная зависимость оптических свойств
наночастиц золота”**

Цель работы:

Исследовать зависимость оптического отклика коллоидных наночастиц золота от их размера. Определить характерный размер наночастиц методом динамического рассеяния света, получить спектры оптической плотности и установить положение максимума локализованного поверхностного плазмонного резонанса. Сопоставить размер частиц со спектральными характеристиками и объяснить значение наблюдаемых эффектов для оптических биосенсоров.

Теоретическое введение

Металлические наночастицы широко применяются в оптических биосенсорах благодаря выраженному взаимодействию свободных электронов металла с электромагнитным излучением. Для наночастиц золота в видимом диапазоне наблюдается локализованный поверхностный плазмонный резонанс (LSPR) — коллективные колебания электронов проводимости, возбуждаемые падающим светом.

Положение и форма плазмонной полосы зависят от размера и формы наночастиц, показателя преломления окружающей среды, межчастичного расстояния и степени агрегации. Поэтому изменение этих параметров приводит к смещению максимума спектра и изменению его ширины и интенсивности. Эта чувствительность используется в безметочных биосенсорах, где связывание биомолекул вблизи поверхности наночастицы изменяет локальное оптическое окружение и, следовательно, регистрируемый спектральный отклик.

Для оценки размера частиц может использоваться динамическое рассеяние света (DLS). Метод основан на регистрации временных флуктуаций интенсивности рассеянного света, связанных с броуновским движением частиц. По коэффициенту диффузии определяется гидродинамический диаметр частиц. Дополнительно оценивается индекс полидисперсности (PDI), характеризующий ширину распределения частиц по размерам.

Оптический отклик оценивается по спектру оптической плотности $A = -\log_{10}(I/I_0)$, где I_0 — интенсивность падающего излучения, а I — интенсивность прошедшего излучения. Для сравнения образцов рекомендуется анализировать положение максимума плазмонной полосы λ_{max} , максимальную оптическую плотность и ширину полосы.

Оборудование

1. Лазерный анализатор Zetasizer Nano ZS.
2. Микропланшетный ридер Infinite 200 PRO.
3. Набор водных дисперсий наночастиц золота различного номинального размера, предоставленный преподавателем.

Идентификатор документа, задачи / ID: 479422 v.1, 450405



ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ПРОСТОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ /
The document is signed with a simple electronic signature

Директор образовательной программы / The Director of the program
Дорожкин Павел Сергеевич / Dorozhkin Pavel Sergeevich

Дата подписания / Date of signing 22.09.2026

4. Кюветы или микропланшеты, дозирующие устройства, одноразовые наконечники, деионизованная вода или буферный раствор для холостого измерения.
5. Персональный компьютер с программным обеспечением для управления измерительным оборудованием и обработки экспериментальных данных.

Выполнение работы

1. Ознакомиться с набором образцов наночастиц золота. Зафиксировать маркировку, номинальный размер и условия хранения каждого образца. Перед измерением аккуратно перемешать дисперсию без образования пузырьков.
2. Подготовить холостой образец, содержащий тот же растворитель или буфер, что и исследуемые дисперсии.
3. Для каждого образца провести измерение методом DLS на приборе Zetasizer Nano ZS. Выполнить не менее трех повторных измерений. Зафиксировать средний гидродинамический диаметр и индекс полидисперсности PDI.
4. Измерить спектр оптической плотности каждого образца на микропланшетном ридере Infinite 200 PRO в спектральном диапазоне, охватывающем плазмонную полосу наночастиц золота. Выполнить коррекцию по холостому образцу и использовать одинаковые геометрические условия для всех измерений.
5. Для каждого спектра определить длину волны максимума плазмонной полосы λ_{max} и соответствующую оптическую плотность A_{max} . При необходимости определить ширину полосы на половине максимума.
6. Нормировать спектры на максимальную оптическую плотность и построить их на одном графике для визуального сравнения формы и положения плазмонной полосы.
7. Построить зависимость λ_{max} от измеренного гидродинамического диаметра частиц. Оценить характер изменения спектрального отклика с увеличением размера наночастиц и обсудить возможное влияние полидисперсности и агрегации.
8. Связать наблюдаемые спектральные изменения с механизмом LSPR и объяснить, почему металлические наночастицы могут использоваться как оптические преобразователи в биосенсорах.
9. Подготовить отчет по лабораторной работе. Отчет должен содержать: название работы, введение, материалы и методы, результаты и обсуждение с графиками/таблицами, выводы и список литературы.

Экспериментальные результаты

1. Таблица для всех исследованных образцов: номинальный размер, гидродинамический диаметр, PDI, λ_{max} и A_{max} .
2. Спектры оптической плотности наночастиц золота различного размера, представленные на одном графике.
3. График зависимости положения максимума плазмонной полосы λ_{max} от гидродинамического диаметра частиц.

4. Оценка повторяемости результатов по серии повторных измерений и обсуждение возможных источников неопределенности.
5. Обсуждение влияния размера, полидисперсности и возможной агрегации наночастиц на оптический отклик, а также связи полученных результатов с принципами работы LSPR-биосенсоров.

Выводы

Выводы должны быть основаны на полученных экспериментальных данных и их сопоставлении с целью работы. Необходимо указать, как изменяются спектральные характеристики наночастиц золота при изменении их размера, насколько согласуются результаты DLS и оптических измерений, и почему размерная зависимость LSPR важна при проектировании оптических биосенсоров.

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой локализованный поверхностный плазмонный резонанс и чем обусловлено его возникновение в наночастицах золота?
2. Какие параметры наночастиц и окружающей среды влияют на положение и форму плазмонной полосы?
3. Что измеряет метод динамического рассеяния света и чем гидродинамический диаметр может отличаться от геометрического размера наночастицы?
4. Что характеризует индекс полидисперсности PDI?
5. Почему агрегация наночастиц золота может приводить к заметному изменению их оптического спектра?
6. Каким образом LSPR может быть использован для регистрации связывания биомолекул на поверхности наночастиц?

Литература

1. Biosensors: Fundamentals and Applications. 2nd Edition. Walter de Gruyter GmbH, Berlin/Boston, 2019. ISBN 978-3-11-063780-9.
2. Modern Biophysical Chemistry: Detection and Analysis of Biomolecules. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2014. ISBN 978-3-527-33773-6.

Методические материалы по выполнению лабораторной работы по дисциплине
“Экспериментальная оптика I”.

Лабораторная работа: **“Оптическая интерферометрия: Введение в различные типы интерферометров, методы интерферометрических измерений и принципы фазовой синхронизации.”**

Цель работы:

Оптические интерферометры играют чрезвычайно важную роль в современной фотонике и находят широкое применение в различных областях, включая оптические телекоммуникации, механический, химический и биологический контроль, а также в детектировании гравитационных волн.

В ходе выполнения данной лабораторной работы вы:

- Соберёте и настроите два основных типа интерферометров:
 - интерферометр Майкельсона,
 - интерферометр Маха-Цендера.
- Определите различия между ними и оцените их пригодность для различных приложений.
- Используйте интерферометр Майкельсона для измерения изменений длин, сравнимых с длиной волны света.
- Примените интерферометр Маха-Цендера для измерения показателя преломления диэлектрического материала.

Теоретическое введение

В этом разделе студентам необходимо провести анализ следующих вопросов:

- Теория оптической интерференции.
- Измерение длины с использованием интерферометра Майкельсона.
- Измерение показателя преломления.
- Интерферометр Маха-Цендера.

Оборудование

1. Гелий-Неоновые лазеры (Thorlabs model HNL 100LB, USA)
2. Цифровые осциллографы (Keysight infiniiVision model DSOX3054T, USA, UNI-T China, model UTD2102C)
3. Фотодиод большой площади Thorlabs (Thorlabs USA, model DET36A2)
4. Вращающаяся ступень и драйвер (Thorlabs model PRM1/MZ8, USA)
5. Пьезоэлектрическая трансляционная платформа (Piezomechanik Dr L Pickelmann GmbH- model SRV150/1)

Выполнение работы

1. Определите длину когерентности лазера с полосой пропускания 10 ГГц.
2. Соберите интерферометр Майкельсона и используйте его для измерения вибраций в лаборатории.

Идентификатор документа, задачи / ID: 479422 v.1, 450405
Документ подписан простой электронной подписью /
The document is signed with a simple electronic signature
Директор образовательной программы / The Director of the program
Дорожкин Павел Сергеевич / Dorozhkin Pavel Sergeevich
Дата подписания / Date of signing 22.09.2026

3. Применить интерферометр Майкельсона для измерения перемещений зеркала на нанометровом масштабе с использованием пьезоэлектрической трансляционной платформы.
4. Используйте интерферометр Майкельсона для определения показателя преломления стеклянной пластины.
5. Соберите и настройте интерферометр Маха-Цендера, а затем наблюдайте возникающие интерференционные картины.

Экспериментальные результаты

- Опишите интерференционную картину полученную с помощью интерферометра Майкельсона. Проанализируйте данные, полученные с помощью фотодетектора, используя быстрый осциллограф в режиме Фурье.
- Измерьте перемещение пьезоэлектрической трансляционной платформы с помощью интерферометра Майкельсона.
- Проанализируйте влияние добавления вращающейся стеклянной пластины в одно из плеч интерферометра. Используйте интерферометр для расчёта показателя преломления этой стеклянной пластины.
- Опишите интерференционную картину, полученную с помощью интерферометра Маха-Цендера с добавлением и без добавления стеклянной пластины в одно из плеч. Выведите уравнения, необходимые для выполнения измерений показателя преломления, ранее проведенных с использованием интерферометра Майкельсона.
- Подготовьте отчет по выполненной работе.

Выводы

Выводы по проделанной работе должны быть основаны на анализе полученных экспериментальных результатов и их сопоставлении с сформулированными в начале работы целью и задачами.

Контрольные вопросы

1. Какова длина когерентности лазера с полосой пропускания 10 ГГц?
2. Какое изменение длины оптического пути соответствует переходу от максимальной к минимальной интенсивности интерференционных полос?
3. Каково предельное изменение оптической разности хода, при котором возможно наблюдение интерференционных полос?
4. Какое минимальное расстояние можно измерить с помощью интерферометра Майкельсона?
5. Какие изменения необходимо внести в формулу для расчёта показателя преломления, применяемую для измерения показателя преломления вращающейся стеклянной пластины, если для того же измерения используется интерферометр Маха-Цендера?

Литература

"Optics", 4th ed., E. Hecht. Addison Wesley, 2016, ISBN 9781292096933
"Introduction to Optics" Pendrotti and Pendrotti, ISBN 9781108428262

Методические материалы по выполнению лабораторной работы по дисциплине
“Физика коллоидов и границ раздела фаз”.

Лабораторная работа: “Получение частиц карбоната кальция микро- и
субмикронного размера”

Цель работы:

Получить дисперсные частицы карбоната кальция методом осаждения из раствора, исследовать влияние условий синтеза на образование и размер частиц и провести их характеризацию. Освоить операции подготовки коллоидного образца, отделения и промывки осадка, диспергирования частиц и определения их характерного размера методом динамического рассеяния света. Связать наблюдаемые свойства системы с процессами зародышеобразования, роста кристаллов, агрегации и межфазными явлениями.

Теоретическое введение

Карбонат кальция является удобной модельной системой для изучения процессов образования дисперсной фазы в растворе. При смешении растворов, содержащих ионы Ca^{2+} и CO_3^{2-} , при достижении пересыщения начинается зародышеобразование, после чего происходит рост частиц. В простейшем виде процесс осаждения может быть записан как $\text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{CaCO}_3\downarrow$.

Размер и морфология образующихся частиц определяются конкуренцией процессов зародышеобразования, роста, агрегации и рекристаллизации. На них влияют концентрация реагентов, степень пересыщения, скорость смешения, интенсивность перемешивания, температура, время выдержки, ионный состав среды и наличие добавок. При более высокой скорости образования зародышей число частиц может увеличиваться, а их характерный размер — уменьшаться; при последующем росте и агрегации, напротив, формируются более крупные структуры.

После синтеза частицы необходимо отделить от растворимых компонентов среды и повторно диспергировать в подходящей жидкости. Для этого применяют центрифугирование, удаление супернатанта, промывку и ресуспендирование. Качество диспергирования существенно влияет на измеряемое распределение частиц по размерам, поскольку агрегаты могут давать вклад, непропорционально большой их численной доле.

Для оценки характерного размера субмикронных и мелких микронных частиц может применяться динамическое рассеяние света (DLS). Метод основан на анализе временных флуктуаций интенсивности рассеянного света, вызванных броуновским движением частиц. По коэффициенту диффузии определяется гидродинамический диаметр с использованием соотношения Стокса–Эйнштейна. При интерпретации результатов необходимо учитывать полидисперсность, возможную агрегацию и ограничения метода для крупных или седиментирующих частиц.

Оборудование

1. Лазерный анализатор Zetasizer Nano ZS.

Идентификатор документа, задачи / ID: 479422 v.1, 450405

 ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ПРОСТОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ /
The document is signed with a simple electronic signature

Директор образовательной программы / The Director of the program
Дорожкин Павел Сергеевич / Dorozhkin Pavel Sergeevich

Дата подписания / Date of signing 22.09.2026

2. Высокоскоростная многофункциональная центрифуга Eppendorf 5430 с соответствующими роторами и адаптерами.
3. Вортекс V-1 plus и мини-ротатор Bio RS-24.
4. Лабораторные весы AND GR-202.
5. Стандартное лабораторное оборудование и расходные материалы: пробирки, дозирующие устройства, одноразовые наконечники, деионизованная вода.
6. Растворы, содержащие ионы кальция и карбоната, и при необходимости дополнительные реагенты, предоставленные преподавателем.
7. Персональный компьютер с программным обеспечением для управления измерительным оборудованием и обработки экспериментальных данных.

Выполнение работы

1. Ознакомиться с протоколом синтеза и подготовить исходные растворы. Конкретные концентрации, объемы, порядок смешения и режим перемешивания задаются преподавателем для используемого варианта лабораторной работы.
2. Подготовить два или более режима синтеза, отличающихся одним заданным параметром (например, концентрацией исходных растворов, скоростью смешения или интенсивностью перемешивания). Остальные условия поддерживать одинаковыми.
3. Провести осаждение карбоната кальция путем смешения исходных растворов в соответствии с заданным протоколом. Зафиксировать момент начала помутнения и качественные изменения дисперсии в процессе выдержки.
4. После завершения синтеза отделить частицы центрифугированием. Осторожно удалить супернатант, не нарушая осадок.
5. Выполнить промывку частиц деионизованной водой: добавить воду к осадку, ресуспендировать образец на вортексе или ротаторе, повторно центрифугировать и удалить супернатант. Число циклов промывки устанавливается преподавателем.
6. После последней промывки приготовить стабильную суспензию частиц для измерений. При необходимости выполнить контролируемое разбавление, используя одну и ту же среду для всех сравниваемых образцов.
7. Для каждого образца выполнить не менее трех измерений на Zetasizer Nano ZS. Зафиксировать характерный гидродинамический размер, ширину распределения или индекс полидисперсности и качество корреляционной функции, если эти параметры доступны в используемом режиме прибора.
8. Сравнить распределения частиц по размерам для разных условий синтеза. Оценить повторяемость измерений и проверить наличие признаков агрегации или седиментации.
9. Объяснить полученные различия с точки зрения пересыщения, зародышеобразования, роста частиц и межчастичных взаимодействий. Отдельно обсудить ограничения DLS при исследовании полидисперсных и микронных дисперсий.
10. Подготовить отчет по лабораторной работе. Отчет должен включать теоретическую и экспериментальную части, описание материалов и методов, результаты с таблицами и графиками, обсуждение, выводы, список литературы и ответы на контрольные вопросы.

Экспериментальные результаты

1. Таблица условий синтеза для каждого образца с указанием варьируемого параметра и основных наблюдений при образовании дисперсии.
2. Таблица результатов характеристики: средний гидродинамический размер, показатель полидисперсности или иной доступный показатель ширины распределения, а также разброс повторных измерений.
3. Графики распределения частиц по размерам для исследованных образцов, представленные в сопоставимом виде.
4. Сравнение образцов, полученных при разных условиях синтеза, и количественная оценка изменения характерного размера частиц.
5. Обсуждение возможных источников неопределенности: неодинаковое смешение, агрегация, загрязнение кюветы, концентрационные эффекты, седиментация и ограничения метода DLS.

Выводы

Выводы должны быть основаны на полученных экспериментальных данных и их сопоставлении с целью работы. Необходимо указать, были ли получены устойчивые дисперсии частиц карбоната кальция, как изменялся их характерный размер при изменении условий синтеза, какие процессы могли определять наблюдаемое распределение частиц по размерам и насколько применим метод DLS для исследованных образцов.

Контрольные вопросы

1. Что такое пересыщение раствора и почему оно является необходимым условием образования новой твердой фазы?
2. Чем гомогенное зародышеобразование отличается от гетерогенного?
3. Какие стадии определяют конечный размер частиц при осаждении карбоната кальция?
4. Почему изменение скорости смешения или концентрации реагентов может влиять на размер частиц?
5. Для чего после синтеза выполняют центрифугирование и промывку частиц?
6. На каком физическом принципе основан метод динамического рассеяния света?
7. Чем гидродинамический диаметр отличается от геометрического размера частицы?

Литература

1. Hans-Jürgen Butt, Karlheinz Graf, Michael Kappl. Physics and Chemistry of Interfaces. Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA, 2003. ISBN 9783527412167.
2. J. N. Israelachvili. Intermolecular and Surface Forces. 3rd ed. Academic Press, 2011. ISBN 9780123751829.

Методические материалы по выполнению лабораторной работы по дисциплине
“Биомедицинские приложения фотоники”.

Лабораторная работа: **"Абсорбционная и флуоресцентная спектроскопия
эндогенных хромофоров (гемоглобин, билирубин)"**

Цель работы:

Получить спектры поглощения и флуоресценции для гемоглобина и билирубина. Построить калибровочную кривую и на ее основе рассчитать спектр молярной экстинкции для каждого из хромофоров. Рассчитать квантовый выход флуоресценции для билирубина. Изучить спектральную зависимость билирубина от времени облучения синим светом.

Теоретическое введение

Спектроскопия поглощения в ультрафиолетовом и видимом диапазонах (UV-Vis) включает в себя поглощение фотонов в ультрафиолетовом и видимом диапазонах электромагнитного спектра, как показано на рисунке 1 (длины волн около 10-700 нм) [1]. В зависимости от вещества, ультрафиолетовые или видимые лучи частично поглощаются образцом. Оставшийся свет, т.е. прошедший свет, регистрируется подходящим детектором в зависимости от длины волны. Затем детектор выдает уникальный UV-Vis спектр образца (также известный как спектр поглощения).

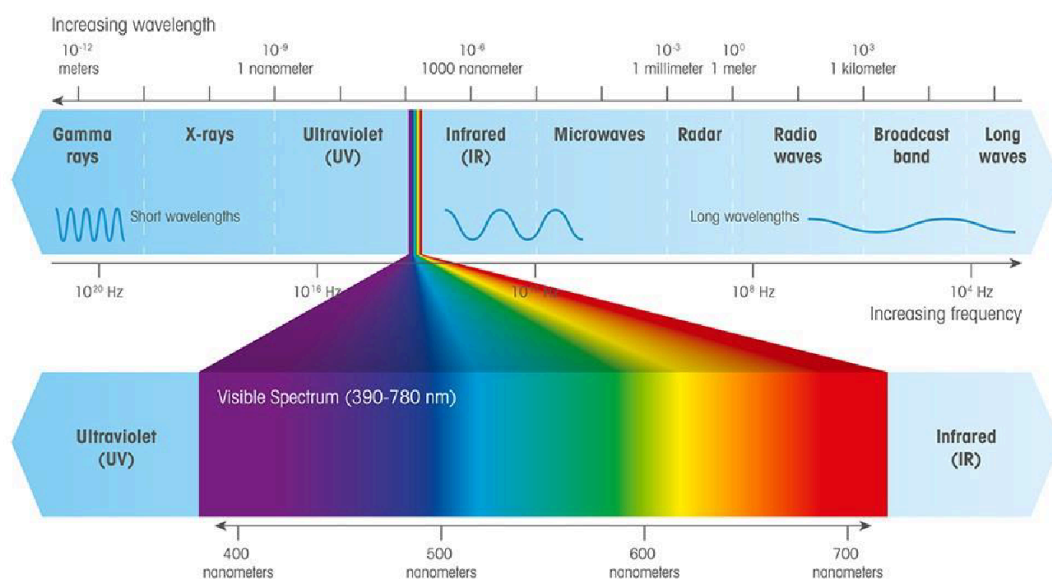


Рисунок 1 Электромагнитный спектр

Ультрафиолетовый и видимый свет обладают достаточной энергией, чтобы перемещать внешние электроны на более высокие энергетические подуровни. Спектры UV-Vis имеют ограниченные возможности для идентификации образцов, но очень полезны для количественных измерений. Концентрацию анализируемого вещества в растворе можно определить, измерив оптическую плотность на некоторой длине волны и применив закон Бугера-Ламберта-Бера. Поскольку диапазон UV-Vis охватывает диапазон остроты зрения человека, составляющий приблизительно 400-750 нм, спектроскопия UV-Vis используется для

Документ подписан и проставлен с помощью электронной подписи /
The document is signed with a simple electronic signature

Директор образовательной программы / The Director of the program
Дорожкин Павел Сергеевич / Dorozhkin Pavel Sergeevich

Дата подписания / Date of signing 22.09.2026

характеризации поглощения, пропускания и отражения различных технологически важных материалов: пигментов, покрытий, стекол и фильтров.

Полная энергия молекулы состоит из электронной, колебательной и вращательной составляющих. Молекулы имеют заполненные и свободные электронные орбитали. Поглощение фотона приводит к переходу электрона на пустую орбиталь с большей энергией, и молекула переходит на более высокий энергетический уровень (молекула в возбужденном состоянии) [3]. Электронные состояния молекулы и переходы между ними проиллюстрированы диаграммой Яблонского (рис. 2).

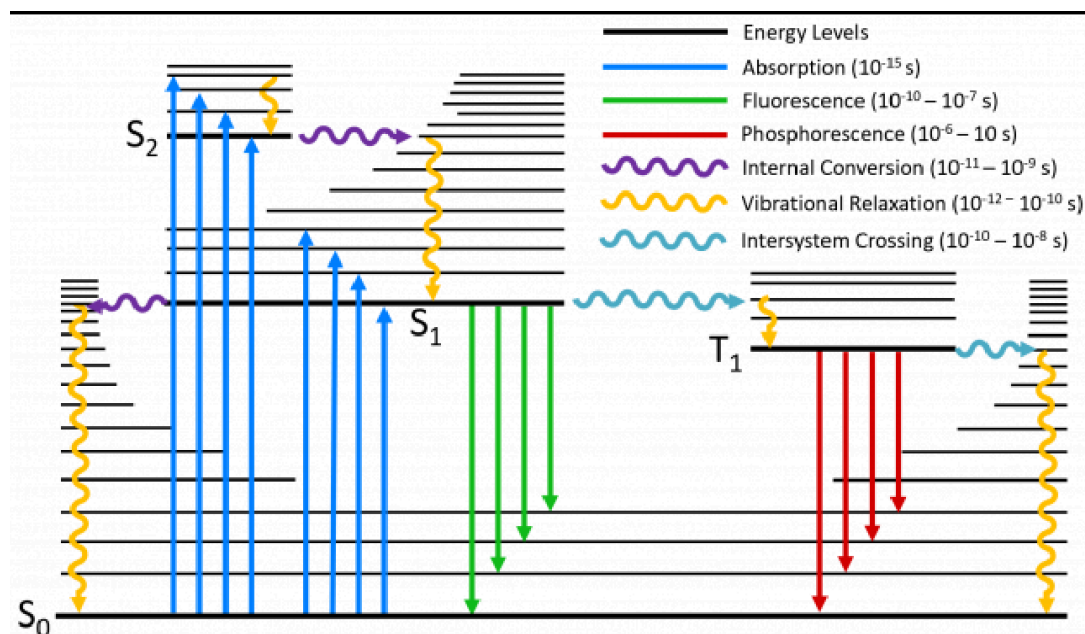


Рисунок 2 Диаграмма Яблонского, иллюстрирующая возможные излучательные и неизлучательные переходы

Основываясь на электронной структуре молекул можно сказать, что все они способны поглощать электромагнитное излучение. Небольшие неполимерные молекулы поглощают излучение в ближнем (300-400 нм), дальнем (200-300 нм) и вакуумном (<200 нм) ультрафиолетовом диапазоне. Теория спектров поглощения хорошо разработана для небольших неорганических молекул. Спектры макромолекул, включая биомолекулы, не анализируются подробно из-за сложности их электронной структуры. Однако это не мешает успешному использованию оптической спектроскопии во многих научных дисциплинах. Многие биологически важные соединения с двойными сопряженными связями поглощают свет в ближнем ультрафиолетовом и видимом диапазонах. Чем больше количество двойных сопряженных связей в молекуле, тем длиннее длина волны максимального поглощения этого вещества. Характеристики спектров поглощения биомолекул позволяют качественно и количественно идентифицировать вещества, изучать механизмы биохимических реакций, особенно взаимодействие белков с лигандами, а также получать информацию об особенностях строения хромофорных групп и активности простетических центров белковых молекул.

Поглощение света молекулами проявляется в ослаблении светового потока после его прохождения через объект. Рассмотрим монохроматический свет интенсивностью I_0 , падающий на кювету с раствором исследуемого вещества. Если молекулы вещества поглощают свет, то в конце оптического пути

интенсивность света уменьшается до I . Значение, равное $T = \frac{I}{I_0}$, называется коэффициентом пропускания. Поглощение света раствором вещества зависит от концентрации вещества, длины оптического пути (толщины образца) и способности вещества поглощать свет определенной длины волны. Эти закономерности выражаются законом Бугера-Ламберта-Бера [5].:

$$A = - \lg I_g(T) = \epsilon \cdot C \cdot l$$

где A - оптическая плотность образца, ϵ - молярный коэффициент поглощения ($\text{см}^{-1} \cdot \text{М}^{-1}$), C - молярная концентрация вещества (М), l - оптический путь (см). Молярный коэффициент экстинкции не зависит от концентрации вещества, а в случае отсутствия взаимодействия между молекулами является функцией длины волны света. Умножение ϵ на C дает коэффициент поглощения: $\mu_a = \epsilon \cdot C$ который измеряется в обратных сантиметрах (см^{-1}).

Различные соединения могут иметь очень разные максимумы поглощения и светопоглощающую способность. Сильно поглощающие соединения необходимо исследовать в разбавленном растворе, чтобы детектор получал значительную световую энергию, а для этого необходимо использовать полностью прозрачные растворители. Наиболее часто используемыми растворителями являются вода, этанол, гексан и циклогексан. Как правило, не рекомендуется использовать растворители с двойными или тройными связями или тяжелыми атомами. Поскольку поглощающая способность образца будет пропорциональна его молярной концентрации в кювете для образцов, при сравнении спектров различных соединений используется скорректированное значение поглощения, известное как молярная поглощающая способность.

Спектрофотометры используются для измерения спектров поглощения. Несмотря на большое разнообразие таких приборов, они основаны на общих принципах регистрации спектра. Схема типичных компонентов спектрометра показана на рисунке 3. Луч света от источника света разделяется на составляющие его длины волн призмой или дифракционной решеткой [6]. Затем каждый монохроматический луч разделяется на два луча равной интенсивности с помощью полужеркального устройства. Один луч, или так называемый "измерительный луч", проходит через небольшую прозрачную кювету, содержащую раствор исследуемого соединения в прозрачном растворителе. Другой луч, эталонный, проходит через идентичную кювету, содержащую только растворитель. Затем интенсивность этих световых пучков измеряется электронными детекторами и сравнивается. Интенсивность эталонного пучка, который практически не поглощает свет, определяется как I_0 . Интенсивность образца пучка определяется как I . За короткий промежуток времени спектрометр автоматически сканирует все составляющие длины волн описанным способом. Обычно сканируется ультрафиолетовая область в диапазоне от 200 до 400 нм, а видимая часть - в диапазоне от 400 до 750 нм.

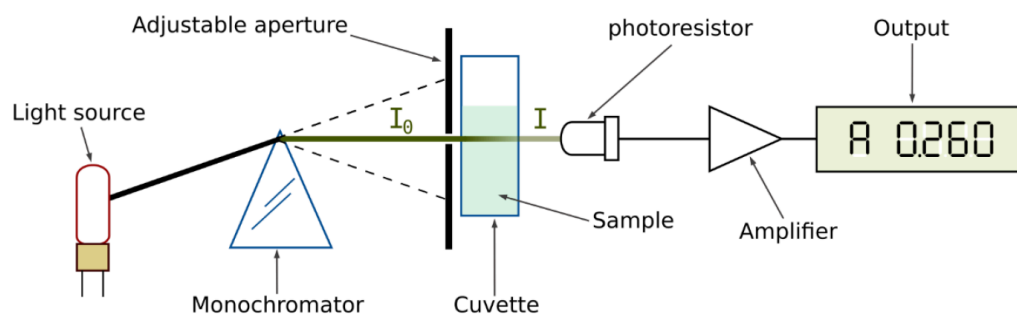
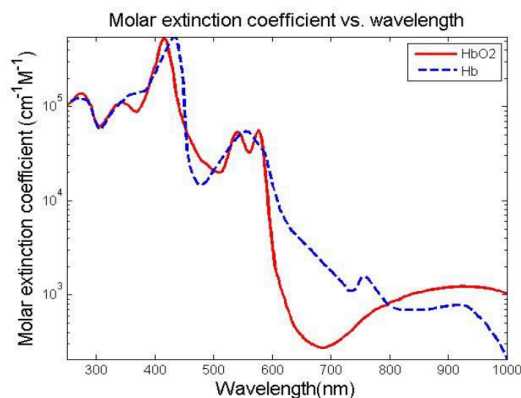


Рисунок 3. Типичная схема UV/Vis спектрометра [7]

Хромофор - это вещество, поглощающее свет, которое может быть как эндогенным соединением, естественным образом присутствующим в организме человека, так и экзогенным агентом, таким как краситель. Основными эндогенными хромофорами являются гемоглобин (окси- и дезоксигемоглобин), миоглобин, билирубин и меланин.

Гемоглобин.

Гемоглобин (Hb), самый важный природный хромофор в организме человека, является железосодержащим металлопротеином, содержащимся в эритроцитах. Он придает крови красный цвет, а его задача - разносить кислород по всему организму [8]. Группа гема обеспечивает гемоглобину способность к связыванию кислорода благодаря наличию атома железа (рис. 4). Каждый белок гемоглобина может связывать четыре молекулы кислорода. Ион железа может находиться либо в состоянии Fe^{2+} , либо в состоянии Fe^{3+} . Однако метгемоглобин (Fe^{3+}) не может связывать и транспортировать кислород. Гемоглобин может быть насыщенным молекулами кислорода – оксигемоглобин (HbO) или ненасыщенным молекулами кислорода – дезоксигемоглобин (Hb). Их спектры поглощения различаются. Спектры поглощения окси- и дезоксигемоглобина показаны на рисунке 4. Между ними существует значительная разница в красной области спектра, где поглощение HbO намного ниже, чем у Hb. При длине волны около 420 нм наблюдается очень сильная полоса поглощения, называемая полосой Soret. Дублет при 540 и 580 нм для HbO и синглет при 560 нм для Hb - это так называемые Q-полосы. Поглощение гемоглобином в области "первого оптического окна" от 650 до 1000 нм находится на минимальном уровне [3]. Характерные особенности спектров поглощения гемоглобина и оксигемоглобина широко используются для количественной оценки степени насыщения гемоглобина кислородом.



Hemoglobin Molecule

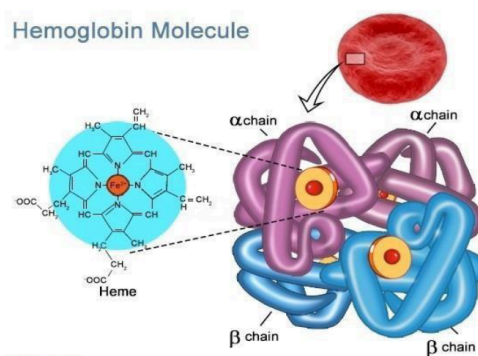


Рисунок 4. Спектр поглощения гемоглобина и оксигемоглобина (слева) и молекула гемоглобина (справа)

Билирубин

Билирубин является продуктом распада гемоглобина. В организме здорового человека все молекулы билирубина, образующиеся из гемоглобина, связываются сывороточным альбумином и транспортируются в печень, где эти комплексы превращаются в моноконъюгаты, которые выводятся с желчью [9]. Однако в первые дни после рождения, различные нарушения могут привести к повышению уровня неконъюгированного билирубина, что происходит из-за того, что сывороточный альбумин у новорожденных (младше пяти месяцев от рождения) имеет меньшее сродство к билирубину, чем у более зрелых детей, и иногда сывороточный альбумин у новорожденных не может связываться с билирубином. связывают весь билирубин, который образуется из гема [10]. Многочисленные исследования показывают, что высокий уровень неконъюгированного билирубина в сыворотке крови может привести к повреждению головного мозга.

Для предотвращения возможных осложнений часто используется фототерапия синим светом. Этот метод был впервые применен в 1950-х годах Кремером и его коллегами [11]. Механизм фототерапии заключается в следующем: при облучении синим светом, длина волны которого близка к пику поглощения билирубина (460-490 нм), билирубин проходит два фотохимических пути. Он может превращаться в свой стереоизомер (также называемый фотоизомером) Z-люмирибин, который также является желтым пигментом с более низким поглощением в синей области спектра, или он может распадаться до бесцветного продукта окисления с более низкой молекулярной массой. В отличие от билирубина, его фотоизомер Z-люмирубин менее гидрофобен и может выводиться с желчью без конъюгации. Однако нет определенного мнения о том, какой из продуктов фототерапии более эффективен с терапевтической точки зрения (продукт окисления или фотоизомеризации), хотя многочисленные клинические исследования показывают эффективность фототерапии желтухи у новорожденных. Некоторые исследования показали, что воздействие бирюзового света более эффективно снижает уровень билирубина, чем воздействие синего света, хотя другие исследования не выявили никакой разницы. В исследовании Времана и соавторов [12] оптимальные скорости фотодеградации билирубина и выработки люмирубина наблюдались при длине волны 500 нм. Спектры поглощения билирубина, а также структура и метаболизм гема показаны на рисунке 5.

Heme metabolism are shown in Figure 5.

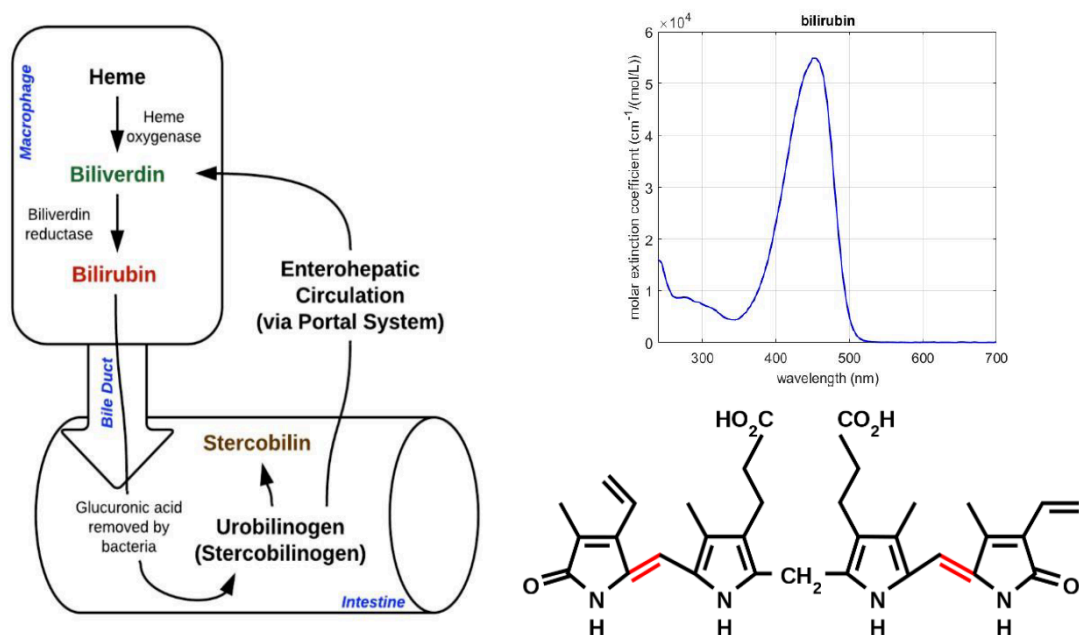


Рисунок 5. Метаболизм гема, спектр поглощения билирубина и его структура [13].

Оборудование

1. Двухрежимный микропланшетный ридер Infinite M Nano+ (Tecan Trading AG, Switzerland).

Выполнение работы

1. Подготовить водные растворы гемоглобина с множеством различных концентраций.
2. Измерить спектры поглощения.
3. Подготовить водные растворы билирубина с множеством различных концентраций.
4. Измерить спектры поглощения и флуоресценции.
5. Провести эксперименты по фотодеградации билирубина
6. Отчет по выполненной работе, включая исходные данные, анализ результатов и выводы, должен быть загружен в LMS Canvas.

Экспериментальные результаты

- Провести анализ спектров поглощения и флуоресценции билирубина и спектров поглощения гемоглобина. Описать характерные пики;
- Определить зависимость поглощения билирубина и гемоглобина от концентрации;
- Вычислить молярный коэффициент экстинкции для всех длин волн. Сравнить полученные результаты с табличными данными;
- Провести анализ зависимости спектров поглощения билирубина от времени облучения синим светом;
- Подготовить отчет по выполненной работе.

Выводы

Выводы по проделанной работе должны быть основаны на анализе полученных экспериментальных результатов и их сопоставлении с сформулированными в начале работы целью и задачами.

Контрольные вопросы

1. Как свет взаимодействует с биомолекулами?
2. Какие типы спектроскопии существуют?
3. Каковы принципы работы UV-Vis спектрометрии?
4. Какие данные могут быть получены, охарактеризованы и вычислены с помощью спектрометрии?
5. Какие диапазоны концентраций для билирубина и гемоглобина считаются нормальными и патологическими?

Литература

- [1] F.-X. Schmid, Biological Macromolecules: UV-visible Spectrophotometry. Encyclopedia of Life Sciences. (2001) 1–4. doi:10.1038/npg.els.0003142
- [2] Ссылка на интернет источник: https://www.mt.com/ru/ru/home/applications/Application_Browse_Laboratory_Analytics/uv-vis-spectroscopy/uvvis-spectroscopy-explained.html
- [3] V.V. Tuchin: Tissue Optics and Photonics: Light-Tissue Interaction II. J of Biomedical Photonics & Eng 2(3) (2016). <https://doi.org/10.18287/JBPE16.02.030201>
- [4] Ссылка на интернет источник: <https://www.edinst.com/blog/jablonski-diagram/>
- [5] Irving J. Bigio, Sergio Fantini, Quantitative Biomedical Optics, (Theory, Methods, and Applications), Cambridge texts in biomedical engineering, Cambridge university press, 2016, 659 p.
- [6] N. Raaman. Phytochemical Techniques, New India Publishing agency, 2006.
- [7] Ссылка на интернет источник: <https://www.mrclab.com/spectrophotometers>
- [8] R. Winslow, Hemoglobin, in: Encycl. Respir. Med. Four-Volume Set, 2006. <https://doi.org/10.1016/B0-12-370879-6/00174-5>.
- [9] J. Fevery, Bilirubin in clinical practice: A review, Liver Int. (2008). <https://doi.org/10.1111/j.1478-3231.2008.01716.x>.
- [10] Z. Uhrikova, M. Zibolen, K. Javorka, L. Chladekova, M. Javorka, Hyperbilirubinemia and phototherapy in newborns: Effects on cardiac autonomic control, Early Hum. Dev. (2015). <https://doi.org/10.1016/j.earlhumdev.2015.03.009>.
- [11] Stokowski, L. A. (2011). Fundamentals of Phototherapy for Neonatal Jaundice. Advances in Neonatal Care, 11, S10–S21. doi:10.1097/anc.0b013e31822ee62c
- [12] J. H. Vreman, S. Kourula, J. Jašprová, L. Ludvíková, P. Klán, L. Muchová, L. Vitek, B. K. Cline, R. J. Wong, D. K. Stevenson. (2019). The effect of light wavelength on in vitro bilirubin photodegradation and photoisomer production. Pediatric Research, doi:10.1038/s41390-019-0310-2
- [13] Ссылка на интернет источник:

<https://teachmephysiology.com/gastrointestinal-system/liver/bilirubin-metabolism/>