

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе и
образовательным инновациям

О.Г. Прохоренко

«30» июня 2022 г.

Регистрационный № УД-11603 /уч.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ В ЭЛЕКТРОХИМИИ

**Учебная программа учреждения высшего образования
по учебной дисциплине для специальности**

1-31 05 01 Химия (по направлениям)

1-31 05 01 01 Научно - производственная деятельность

2022 г.

Учебная программа составлена на основе образовательного стандарта 1-31 05 01-2013 и учебного плана G-31-155/уч 2013 г.

СОСТАВИТЕЛИ:

Е.А.Стрельцов, заведующий кафедрой электрохимии Белорусского государственного университета, доктор химических наук, профессор

Г.А.Рагойша, доцент кафедры электрохимии Белорусского государственного университета, кандидат химических наук, доцент

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

Кулак А.И., директор ИОНХ НАН Беларуси, академик НАН Беларуси, д.х.н., профессор

РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:

Кафедрой электрохимии Белорусского государственного университета (протокол № 14 от 04. 05. 2022 г.)

Научно-методическим Советом БГУ (протокол № 5 от 27 мая 2022 г.)

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Предметом данного курса является детальное знакомство студентов с электрохимическими и физическими методами, которые используются для изучения поверхности металлических и полупроводниковых электродов, протекающих на них реакций, а также структуры двойного электрического слоя.

Цели и задачи учебной дисциплины

Цель учебной дисциплины заключается в том, чтобы дать студенту понимание принципиальных основ, теоретической базы, практических возможностей, а также ограничений электрохимических и физических методов исследования электрохимических объектов. Курс знакомит с принципами функционирования, аппаратным оформлением рассматриваемых методов и условиями проведения эксперимента, прививает умение интерпретировать и грамотно оценивать экспериментальные данные.

Задачи учебной дисциплины:

- познакомить студентов с базовыми электрохимическими и физическими методами исследований электрохимических объектов;
- формирование у студентов четкого представления о круге задач, решаемых с использованием данных методов, об их возможностях и ограничениях.

Место учебной дисциплины в системе подготовки специалиста с высшим образованием.

Учебная дисциплина «Методы исследования в электрохимии» относится к циклу дисциплин специализаций компонента учреждения образования.

Связи с другими учебными дисциплинами: «Физическая химия», «Неорганическая химия» (учебные дисциплины компонента учреждения высшего образования).

Требования к компетенциям

В результате изучения учебной дисциплины «Методы исследования в электрохимии» студент должен закрепить и развить следующие **академические (АК), профессиональные (ПК) и социально-личностные (СЛ) компетенции:**

- АК-1. Уметь применять базовые научно-теоретические знания для решения теоретических и практических задач.
- АК-2. Владеть системным и сравнительным анализом.
- АК-3. Владеть исследовательскими навыками.
- АК-4. Уметь работать самостоятельно.
- АК-5. Быть способным порождать новые идеи (обладать креативностью).
- АК-6. Владеть междисциплинарным подходом при решении проблем.
- АК-7. Иметь навыки, связанные с использованием технических устройств, управлением информацией и работой с компьютером.

- АК-8. Владеть навыками устной и письменной коммуникации.
- СЛК-6. Уметь работать в команде.
- ПК-1. Использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, анализировать перспективы и направления развития отдельных областей химической науки.
- ПК-2. Принимать участие в научных исследованиях, связанных с совершенствованием и развитием химии, современных ее направлений и физико-химических методов исследования.
- ПК-3. Формулировать цели и задачи научно-исследовательской деятельности, осуществлять ее планирование, принимать участие в подготовке отчетов и публикаций.
- ПК-8. Осуществлять поиск, систематизацию и анализ информации по перспективам развития отрасли, инновационным технологиям, проектам и решениям.
- ПК-9. Работать с научной, технической и патентной литературой, электронными базами данных.
- ПК-17. Готовить доклады, материалы к презентациям и представлять их.
- ПК-18. Пользоваться глобальными информационными ресурсами.

В результате изучения учебной дисциплины «Методы исследования в электрохимии» студент должен *знать*:

- принцип действия потенциостатов и использование трехэлектродной схемы электрохимической поляризации;
- основные варианты использования потенциостатического, потенциодинамического, гальваностатического и гальванодинамического режимов поляризации и электрохимической импедансной спектроскопии;
- характер практических и научных задач, решаемых с помощью методов вольтамперометрии, хроноамперо- и хронопотенциометрии, импедансной спектроскопии, а также методов сканирующей зондовой микроскопии и электрохимической кварцевой микрогравиметрии.

уметь:

- корректно провести простейший электрохимический эксперимент связанный с получением вольтамперограмм и спектров импеданса на различных типах рабочих электродов (металлы, графит, стеклоуглерод, полупроводники, пленки и наноструктуры на проводящих подложках и др.);
- подбирать электроды, электролиты, типы электрохимических ячеек для изучения неорганических и органических объектов;
- работать с ресурсами глобальной компьютерной сети при решении электрохимических задач;

владеть:

- электрохимическими методами исследований для решения конкретных научно-исследовательских и практических электроаналитических задач.

Структура учебной дисциплины

Данная учебная дисциплина преподается на 4-м курсе в 7-м семестре.

Учебный курс рассчитан на 110 часов, из них 50 аудиторных. Примерное распределение аудиторных часов учебного курса по видам занятий: лекции – 14 часов, семинарские занятия - 2 часа, лабораторные занятия – 24 часа, управляемая самостоятельная работа – 10 часов.

Трудоемкость учебной дисциплины составляет 2,5 зачетные единицы.

Форма текущей аттестации по учебной дисциплине – экзамен.

СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

Введение

Роль электрохимических методов исследования в электроанализе и в качестве методов исследования объектов физической химии и химии материалов

Тема 1. Экспериментальные методы электрохимии.

Потенциал и ток в электрохимических системах как источник информации о составе растворов, составе, структуре и свойствах электродов, условиях протекания и скорости электрохимических реакций. Режимы получения электрохимической информации. Классификация электрохимических методов по реализуемым в них способам электрохимического контроля состояния электрода и измерения отклика. Методы, основанные на совместном электрохимическом и неэлектрохимическом воздействием на электрод (фотоэлектрохимические методы, электрохимическая наногравиметрия и др.).

Тема 2. Техника электрохимического эксперимента.

Приборы и устройства для электрохимических измерений. Электроды сравнения. Вспомогательные электроды. Фоновые электролиты, их функции и критерии выбора. Методы подготовки рабочих электродов для воспроизводимых электрохимических измерений. Типы электрохимических ячеек, критерии их выбора для решения разных задач. Измерение потенциала электрода. Измерение тока. Омическое падение напряжения в растворе и его компенсация в исследованиях электродных процессов. Потенциостаты.

Тема 3. Потенциостатический, потенциодинамический, гальваностатический и гальванодинамический режимы получения вольтамперометрических данных. Хроноамперометрия и хронопотенциометрия.

Режимы вольтамперометрических измерений и исследования релаксационных характеристик электрохимических систем, их выбор и практическая реализация с использованием потенциостатов. Компьютерные программы для управления потенциостатами и основы методики их использования. Ознакомление с основными функциями программ обработки данных, используемых совместно с современными потенциостатами.

Тема 4. Исследование микрогетерогенных систем и наноструктур вольт-амперометрическими, хроноамперометрическими и хронопотенциометрическими методами

Подготовка объекта к электрохимическому исследованию, выбор методов и режимов измерений. Методические приемы работы с разными типами объектов. Качественная интерпретация зависимостей тока и потенциала от времени, вольтамперограмм и получение количественной информации методами компьютерной обработки данных.

Тема 5. Электрохимические методы, использующие зондирование объектов на переменном токе. Концепция электрохимического импеданса.

Вольтамперометрия с использованием переменного тока. Концепция электрохимического импеданса. Математические методы описания импеданса. Действительная и мнимая части импеданса. Сдвиг фаз. Модуль импеданса. Спектры импеданса. Спектрометры импеданса.

Эквивалентные электрические схемы. Элементы и параметры эквивалентных схем и их соответствие объектам и параметрам электрохимической системы. Емкость двойного электрического слоя, сопротивление межфазного переноса заряда, адсорбционная емкость, емкость области пространственного заряда в полупроводниковых электродах, диффузионный импеданс для неограниченной и пространственно ограниченной диффузии.

Обратная задача импедансной спектроскопии – получение информации об объекте путем анализа частотных характеристик его электрохимического отклика. Программа EIS Spectrum Analyser и основы ее использования для анализа спектров импеданса.

Тема 6. Потенциодинамическая электрохимическая импедансная спектроскопия (ПДЭИС).

Основы методики исследования микрогетерогенных систем и наноструктур методом стационарной электрохимической импедансной спектроскопии. Ознакомление с ресурсами глобальной компьютерной сети, используемыми в электрохимических исследованиях.

Зависимости спектров импеданса и параметров эквивалентных электрических схем от потенциала электрода. Получение из спектров ПДЭИС зависимостей Мотта-Шоттки и исследование динамики составляющих электрохимического отклика, представленных в эквивалентной электрической схеме.

Тема 7. Методы сканирующей зондовой микроскопии (сканирующая туннельная и атомно-силовая микроскопия, сканирующая потенциометрия) на границе электрод/раствор. Электрохимическая кварцевая микрогравиметрия (electrochemical quartz crystal microbalance).

Особенности применения данных методов в исследовании электрохимических систем, примеры конкретных электрохимических систем. Требования к электродам, электролитам. Использование методов в нанотехнологиях.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов					Количество часов УСР	Форма контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия	Иное		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Тема 1. Экспериментальные методы электрохимии. Их применение в электроанализе и в качестве методов исследования объектов физической химии и химии материалов	2			2		2	Устный и письменный опрос
2	Тема 2. Техника электрохимического эксперимента. Приборы и устройства для электрохимических измерений (потенциостаты, электроды, электрохимические ячейки и др.)	2		2	2		2	Устный и письменный опрос
3	Тема 3. Потенциостатический, потенциодинамический, гальваностатический и гальванодинамический режимы получения вольтамперометрических данных. Хроноамперометрия и хронопотенциометрия.	2			4			
4	Тема 4. Исследование микрогетерогенных систем и наноструктур вольтамперометрическими, хроноамперометрическими и хронопотенциометрическими методами	2			2		2	Письменный отчет по аудиторным практическим упраж-

								нениям
5	Тема 5. Электрохимические методы, использующие зондирование объектов на переменном токе. Концепция электрохимического импеданса. Электрохимическая импедансная спектроскопия стационарных объектов	2			8		4	Устный и письменный опрос, контрольная работа
6	Тема 6. Потенциодинамическая электрохимическая импедансная спектроскопия	2			4			
7	Тема 7. Методы сканирующей зондовой микроскопии на границе электрод/раствор. Электрохимическая кварцевая микрогравиметрия	2			2			
	Итого	14		2	24		10	

ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Перечень основной литературы

1. Электроаналитические методы : теория и практика / ред. Ф. Шольц ; пер. с англ. под ред. В. Н. Майстренко. - Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. - 326 с.
2. Дамаскин, Б. Б. Электрохимия : учеб. пособие для студ., обуч. по напр. подготовки "Химия" / Б. Б. Дамаскин, О. А. Петрий, Г. А. Цирлина. - Изд. 3-е, испр. - Санкт-Петербург [и др.] : Лань, 2022. - 672 с.
3. Методы и достижения современной аналитической химии : учебник (учебное пособие) / [Г. К. Будников и др.] ; под ред. В. И. Вершинина. - Изд. 2-е, стер. - Санкт-Петербург ; Москва ; Краснодар : Лань, 2021. - 587 с.
4. Стрельцов, Е. А. Электрохимия полупроводников: учеб. пособие для студ. учреждений высш. образования по химическим спец. / Е. А. Стрельцов. - Минск : БГУ, 2012. - 159 с.
5. Bondarenko A.S., Ragoisha G.A. EIS Spectrum Analyser, 2013. Электронный ресурс (компьютерная программа для расчета и анализа спектров электрохимического импеданса с руководством пользователя):
<http://www.abc.chemistry.bsu.by/vi/analyser/>

Перечень дополнительной литературы

6. Bard A. J., Faulkner L.R. Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications. 2nd Ed. N. Y.: Wiley. 2001. – 856 p.
7. Compton R.G., Batchelor-McAuley C., Dickinson E.J.F. Understanding Voltammetry: Problems and Solutions, World Scientific, 2011. – 272 p.
8. Compton R. G., Kätelhön E., Ward K.R., Laborda E. Understanding Voltammetry. Simulation of Electrode Processes, 2nd Edition. World Scientific, 2020. – 324 p.
9. Рагойша Г.А. Электронные ресурсы по теме «Потенциодинамическая электрохимическая импедансная спектроскопия»:
<http://www.abc.chemistry.bsu.by/vi/>
10. Ragoisha G.A. Challenge for electrochemical impedance spectroscopy in the dynamic world // J. Solid State Electrochem. 2020. Vol. 24. – P. 2171–2172.
11. Orazem M. E., Tribollet B. Electrochemical Impedance Spectroscopy, 2nd Edition. Wiley, 2017. – 768 p.
12. Lasia A. Electrochemical Impedance Spectroscopy and its Applications. Springer. 2014. – 367 p.

Перечень рекомендуемых средств диагностики и методика формирования итоговой отметки

Текущий контроль качества усвоения студентами знаний по данной учебной дисциплине может осуществляться с использованием следующих средств диагностики:

- письменных контрольных работ (в том числе в виде тестов) по отдельным темам учебной программы, а также по содержанию учебной дисциплины в целом;
- устного и письменного опросов при проведении аудиторных занятий;
- контрольных работ по решению задач.

Формой текущей аттестации по дисциплине «Методы исследования в электрохимии» учебным планом предусмотрен экзамен.

Примерные весовые коэффициенты, определяющие вклад текущего контроля знаний и текущей аттестации в итоговую отметку:

Формирование отметки за текущую успеваемость:

- ответы на семинарских занятиях – 25 %;
- контрольные работы – 50 %;
- письменный отчет по аудиторным практическим упражнениям – 25 %.

Итоговая отметка по дисциплине рассчитывается на основе отметки текущей успеваемости (рейтинговой системы оценки знаний) и экзаменационной отметки с учетом их весовых коэффициентов. Вес отметки по текущей успеваемости составляет 40 %, экзаменационной отметки – 60 %.

Примерные перечни заданий управляемой самостоятельной работы обучающихся по учебной дисциплине

Тема 1. Экспериментальные методы электрохимии. Их применение в электроанализе и в качестве методов исследования объектов физической химии и химии материалов (2 ч.)

Создать перечень основных ресурсов сети Интернет по электрохимическим и электроаналитическим методам (критерии включения ресурса в перечень, учитывающие актуальность и надежность информации, сообщаются студентам преподавателем).

Форма контроля – Устный и письменный опрос.

Тема 2. Техника электрохимического эксперимента. Приборы и устройства для электрохимических измерений

Ознакомиться с типами и характеристиками современных потенциостатов по сайтам производителей (актуальный на время выполнения задания примерный перечень производителей потенциостатов предоставляется преподавателем).

Форма контроля – Устный и письменный опрос.

Тема 4. Исследование микрогетерогенных систем и наноструктур вольтамперометрическими, хроноамперометрическими и хронопотенциометрическими методами.

Определить вероятные типы нуклеации при электроосаждении металлов путем анализа предоставленных в научной статье транзиентов тока.

Форма контроля – Письменный отчет.

Тема 5. Электрохимические методы, использующие зондирование объектов на переменном токе. Концепция электрохимического импеданса. Электрохимическая импедансная спектроскопия стационарных объектов.

1. Ознакомиться с электронным ресурсом <http://www.abc.chemistry.bsu.by/vi/analyser/> (EIS Spectrum Analyser – программа для расчета и анализа спектров электрохимического импеданса с руководством пользователя). Выполнить тестовые упражнения (2 ч.).

Форма контроля – Контрольная работа

2. Ознакомиться с примерами исследований микрогетерогенных систем и наноструктур электрохимическими методами, исследующими отклики объектов на переменном токе, по научным статьям, опубликованным в международных научных журналах с участием студентов и аспирантов химического факультета БГУ (2 ч.).

Форма контроля – Устный и письменный опрос.

Примерная тематика семинарских занятий

Семинар № 1. Техника электрохимического эксперимента. Приборы и устройства для электрохимических измерений. Решение задач.

Примерная тематика задач:

Представьте графически и сравните предоставленные преподавателем экспериментальные данные, характеризующие зависимость тока от потенциала

рабочего электрода в трехэлектродной ячейке, а также от разности потенциалов рабочего и вспомогательного электродов.

Какие из полученных графиков характеризуют условия протекания электрохимических реакций на рабочем электроде? Для чего необходимы вспомогательный электрод и электрод сравнения при электрохимической характеристике данных реакций? Предположите вероятный характер искажения зависимости тока от потенциала при проведении вольтамперометрического эксперимента без использования капилляра Луггина, а также при малой концентрации фонового электролита.

Методические рекомендации по организации самостоятельной работы обучающихся

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.

На освоение учебного материала в рамках УСП для специальностей высшего образования I ступени может отводиться до 20 % от аудиторных часов, выделенных на изучение соответствующей дисциплины (при необходимости до 40%); для II ступени высшего образования – до 50 % от аудиторных часов, выделенных на изучение соответствующей дисциплины; для заочной формы получения высшего образования и для образовательных программ дополнительного образования взрослых – обеспечить сопровождение ЭСО часов, выделенных на самостоятельную работу.

Примерный перечень вопросов к экзамену

1. Пассивные и активные измерения в электрохимическом эксперименте. Измерение потенциала электрода и тока в электрохимических системах. Потенциометрия. Вольтамперометрия.
2. Электроды сравнения, рабочие и вспомогательные электроды.
3. Обоснуйте необходимость использования трехэлектродных ячеек, капилляра Луггина и фонового электролита в вольтамперометрии.
4. Подготовка поверхности электрода, определение площади реальной поверхности электрода.
5. Хроноамперометрия. Уравнение Коттрелла.

6. Стационарная вольтамперометрия, форма вольтамперометрической волны, ее происхождение.
7. Потенциодинамическая вольтамперометрия. Форма потенциодинамической вольтамперограммы, зависимость величины тока в пике вольтамперограммы от скорости сканирования потенциала.
8. Циклическая вольтамперометрия. Оценка обратимости реакции и ее вероятного механизма методом циклической вольтамперометрии.
9. Инверсионная вольтамперометрия и импульсные методы в электроанализе.
10. Вольтамперометрия на вращающемся дисковом электроде.
11. Электрохимический импеданс. Частотные зависимости импеданса основных элементов электрохимических электрических цепей (конденсатора, резистора, элемента Варбурга, элемента постоянной фазы).
12. Спектры импеданса. Диаграммы Найквиста и Боде.
13. Представление объектов электрохимической системы (двойной электрической слой, межфазный перенос заряда в электрохимической реакции, диффузия электроактивных частиц) элементами электрической цепи. Эквивалентные электрические схемы электрохимических систем.
14. Прямая и обратная задачи электрохимической импедансной спектроскопии (получение спектров импеданса электрохимических объектов и нахождение их параметров из спектров импеданса).
15. Выбор эквивалентной схемы и критерии ее соответствия экспериментальным данным при анализе спектров электрохимического импеданса.
16. Потенциодинамическая электрохимическая импедансная спектроскопия.
17. Сканирующая зондовая микроскопия. Особенности использования зондовой микроскопии в исследовании электрохимических систем.
18. Электрохимическая кварцевая микрогравиметрия.

ПРОТОКОЛ СОГЛАСОВАНИЯ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ УВО

Название учебной дисциплины,	Название кафедры	Предложения об изменениях в содержании учебной программы	Решение, принятое кафедрой, разработавшей учебную

с которой требуется со- гласование		учреждения высшего образования по учебной дисциплине	программу (с ука- занием даты и номера протокола)

**ДОПОЛНЕНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ К УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЕ ПО
ИЗУЧАЕМОЙ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ**
на 2022 /2023 учебный год

№ п/п	Дополнения и изменения	Основание
1	Обновлен список рекомендуемой ли- тературы	Актуализация источников ин- формации

Учебная программа пересмотрена и одобрена на заседании кафедры электрохимии (протокол № 14 от 04. 05. 2022 г.)

Заведующий кафедрой электрохимии
доктор химических наук,
профессор



Е.А. Стрельцов