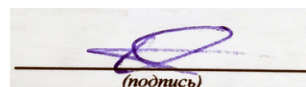


МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова

Базовая кафедра нанотехнологий в электронике
в ЯФ ФГБУН ФТИАН им. К. А. Валиева РАН

УТВЕРЖДАЮ
Декан физического факультета


(подпись)

И.С.Огнев

« 23 » мая 2023 г.

Рабочая программа дисциплины
«Теория и методы электрохимической импеданс-спектроскопии»

Направление подготовки
11.04.04 Электроника и наноэлектроника

Направленность (Профиль)
«Интегральная электроника и наноэлектроника»

Форма обучения
очная

Программа рассмотрена
на заседании базовой кафедры
нанотехнологий в электронике
протокол № 8 от «30» марта 2023 г.

Программа одобрена НМК
физического факультета
протокол №5 от «25» апреля 2023 г.

Ярославль

1. Цели освоения дисциплины

Целью освоения дисциплины «Теория и методы электрохимической импеданс-спектроскопии» является подготовка специалистов с широким набором компетенций в области электрохимической импедансной спектроскопии.

2. Место дисциплины в структуре ОП магистратуры

Дисциплина «Теория и методы электрохимической импеданс-спектроскопии» является факультативной дисциплиной основной общеобразовательной программы 11.04.04 «Электроника и нанoeлектроника».

Освоение данной дисциплины базируется на знаниях, полученных в результате изучения дисциплин естественно-научного цикла и в том числе базовых курсов общей физики, химии и электричества, а также дисциплин профессионального модуля, таких как «Кристаллография и кристаллохимия», «Физические основы электроники», «Физические методы исследования микро- и наноструктур», «Физика полупроводников».

Дисциплина «Теория и методы электрохимической импеданс-спектроскопии» является специальной дисциплиной профессионального цикла. Она формирует компетенции в области импедансной спектроскопии, сформированные с использованием понятийного аппарата физики твердого тела и физики полупроводников. Дисциплина представляет собой изложение разделов стандартного курса электрохимической импеданс-спектроскопии, написанное на языке физической кинетики. При этом дисциплина основана на оригинальном экспериментальном материале и на собственных теоретических разработках авторов. Постановка краевых задач переноса заряда, их решение и интерпретация результатов являются оригинальными и даются с использованием физической терминологии и понятийного аппарата.

3. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения ОП магистратуры

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих элементов компетенций в соответствии с ФГОС ВО, ОП ВО и приобретения следующих знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности:

Формируемая компетенция (код и формулировка)	Индикатор достижения компетенции (код и формулировка)	Перечень планируемых результатов
---	--	---

		обучения
Профессиональные компетенции		
ПК-4 Способен к организации и проведению экспериментальных исследований с применением современных средств и методов	<p>ИД_ПК-4.1. Знает способы организации и проведения экспериментальных исследований.</p> <p>ИД_ПК-4.2. Способен самостоятельно проводить экспериментальные исследования.</p> <p>ИД_ПК-4.3. Демонстрирует навыки проведения исследований с применением современных средств и методов.</p>	<p>Знать:</p> <ul style="list-style-type: none"> • основы теории функций комплексного переменного; • представление комплексных функций на фазовой плоскости; • основы ионной проводимости твердых тел; • комплексное сопротивление и комплексная проводимость; • методы моделирования импеданса, структурная модель; • идеальные и неидеальные элементы структурной модели; • разработка и построение структурных моделей электрохимических систем; • постановка и решение краевых задач электропроводности и массопереноса; • аналоговые и цифровые методы измерения импеданса. <p>Уметь:</p> <ul style="list-style-type: none"> • выполнять измерения на стандартных импеданс-спектрометрах; • отображать результаты измерений в виде диаграмм Боде и Найквиста • разрабатывать на основе диаграмм структурные модели исследуемых образцов; • рассчитывать импеданс структурной модели и сопоставлять его с результатами эксперимента; • ставить и решать краевые задачи электропроводности и массопереноса. <p>Владеть:</p>

		<ul style="list-style-type: none"> • методами работы на стандартных импеданс-спектрометрах и гальваностатах-потенциостатах; • методами обработки и графического представления результатов измерений с использованием прикладных программ.
--	--	---

4. Объем, структура и содержание дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 2 зачетных единиц, 72 акад. часов.

№ п/п	Темы (разделы) дисциплины, их содержание	Семестр	Виды учебных занятий, включая самостоятельную работу студентов, и их трудоемкость (в академических часах)						Формы текущего контроля успеваемости Форма промежуточной аттестации (по семестрам)
			Контактная работа						
			Лекции	Практические	Лабораторные	Консультации	Аттестационные испытания	Самостоятельная работа	
1	Краткий очерк истории развития импеданс-спектроскопии.	1	1						
2	Комплексные числа и комплекснозначные функции.	1	2						
3	Импеданс идеальных структурных элементов и их цепей. Представление импеданса на фазовой плоскости.	1	3					2	Задания для самостоятельной работы
4	Электрохимический импеданс.	1	3	4				1	Задания для самостоятельной работы
5	Импеданс Варбурга.	1	3	2		2		1	Задания для самостоятельной работы
6	Импеданс Геришера.	1	4	2				1	Задания для самостоятельной работы
7	Элемент постоянной фазы.	1	4					2	Задания для самостоятельной работы
8	Обобщенный элемент Варбурга.	1	4	1				2	Задания для самостоятельной работы
9	Обобщенный элемент Геришера.	1	4	1				2	Задания для самостоятельной работы
10	Определение параметров	1	4	4		2		2	Задания для самостоятельной

	твердых электролитов методом ЭИС.								работы
11	Методы измерения электрохимического импеданса.		4	2				2	Задания для самостоятельной работы
	Всего за 1 семестр		36	16		4	0,3	15,7	
	Зачет								Зачет
	Всего		36	16		4	0,3	15,7	

Содержание разделов дисциплины:

4.1 Краткий очерк истории развития импеданс-спектроскопии.

Этапы развития импеданс-спектроскопии. Терминология, первичные понятия об импедансе. Значимые имена в истории развития импеданс-спектроскопии: Иоганн Виктор Витлисбах, Хевисайд, Кеннелли, Джон Амброс Флеминг, Штейнметц, Варбург, Коул и Коул.

4.2 Комплексные числа и комплекснозначные функции.

Определение комплексного числа, представление на комплексной плоскости. Представление электрического сопротивления в комплексной форме. Импеданс цепи структурных элементов с сосредоточенными параметрами.

4.3 Импеданс идеальных структурных элементов и их цепей. Представление импеданса на фазовой плоскости

Выражение для импеданса элементов электрической цепи RLC. Вычисление импеданса электрических цепей составленных из идеальных структурных элементов. Описание динамических систем методом фазового портрета. Графическое представление импеданс-спектров, диаграмма Найквиста и диаграмма Боде

4.4 Электрохимический импеданс.

Сравнение классического и структурного подхода в изучении электрохимических систем. Понятие эквивалентной схемы и построение математической модели в рамках структурного подхода. Диаграммы Найквиста и Боде для модели идеально поляризуемого электрода. Электрод с фарадеевским процессом.

4.5 Импеданс Варбурга

Полубесконечный диффузионный элемент. Электрохимические процессы, которые моделирует импеданс Варбурга. Конечный диффузионный импеданс при условиях непроницаемости и прозрачности границы.

4.6 Импеданс Геришера.

Отличие диффузионных моделей Варбурга и Геришера. Импеданс Геришера для:

- полупространства;
- конечного диффузионного элемента при условии непроницаемости границы;
- конечного диффузионного элемента при условии прозрачности границы.

4.7 Элемент постоянной фазы.

Определение элемента постоянной фазы. Фактор неидеальности. Связь элемента постоянной фазы с идеальными структурными элементами. Диаграммы Найквиста для элемента постоянной фазы. Роль элемента постоянной фазы при интерпретации экспериментальных данных.

4.8 Обобщенный элемент Варбурга

Понятие обобщенного элемента Варбурга и его связь с элементом постоянной фазы. Физический смысл обобщенного элемента Варбурга. Обобщенный элемент Варбурга для полупространства. Конечный обобщенный элемент Варбурга для условий непроницаемости и прозрачности границы.

4.9 Обобщенный элемент Геришера

Понятие обобщенного элемента Геришера и его связь с элементом постоянной фазы. Физический смысл обобщенного элемента Геришера. Обобщенный элемент Геришера для полупространства. Конечный обобщенный элемент Геришера для условий непроницаемости и прозрачности границы.

4.10 Определение параметров твердых электролитов методом ЭИС.

Тестовая структура для измерения импеданса твердого электролита. Диаграммы Найквиста тестовой структуры. Структурная модель тестовой структуры. Амплитуда Варбурга и ее связь с параметрами электролита. Пример экспериментального определения коэффициента диффузии ионов лития.

4.11 Методы измерения электрохимического импеданса

Мостовой метод. Мосты Уитстона и Вина. Условия равновесия мостов и вывод формул для вычисления импеданса. Использование аналого-цифровых методов обработки сигналов для вычисления сдвига фазы колебаний напряжения и тока.

5. Образовательные технологии, используемые при осуществлении образовательного процесса по дисциплине

В процессе обучения используются следующие образовательные технологии:

Вводная лекция – дает первое целостное представление о дисциплине и ориентирует студента в системе изучения данной дисциплины. Студенты знакомятся с назначением и задачами курса, его ролью и местом в системе учебных дисциплин и в системе подготовки в целом. Дается краткий обзор курса, история развития науки и практики, достижения в этой сфере, имена известных ученых, излагаются перспективные направления исследований. На этой лекции высказываются методические и организационные особенности работы в рамках данной дисциплины, а также дается анализ рекомендуемой учебно-методической литературы.

Академическая лекция (или лекция общего курса) – последовательное изложение материала, осуществляемое преимущественно в виде монолога преподавателя. Требования к академической лекции: современный научный уровень и насыщенная информативность, убедительная аргументация, доступная и понятная речь, четкая структура и логика, наличие ярких примеров, научных доказательств, обоснований, фактов.

Практическое занятие – занятие, посвященное освоению конкретных умений и навыков и закреплению полученных на лекции знаний.

В процессе обучения используются следующие технологии электронного обучения и дистанционные образовательные технологии:

Электронное учебно-методическое пособие «Методы исследования материалов для твердотельных ЛИА» в LMS Электронный университет Moodle ЯрГУ и образовательная платформа онлайн-обучения DemidOnline (OpenEDX), в которых:

- представлены задания для самостоятельной работы студентов по темам дисциплины;
- представлен список литературы, рекомендуемой для освоения дисциплины;
- представлена информация о форме и времени проведения консультаций по дисциплине в случае их проведения в дистанционном формате в режиме онлайн.

Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине, включая перечень лицензионного программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

В процессе осуществления образовательного процесса используются:

- для формирования текстовых и графических материалов промежуточной и текущей аттестации – программы Microsoft Office, графический редактор Inkscape;
- для поиска учебной литературы библиотеки ЯрГУ – Автоматизированная библиотечная информационная система "БУКИ-NEXT" (АБИС "Буки-Next").

6. Перечень основной и дополнительной учебной литературы, ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины

а) основная литература

1. Е.С. Буянова. Импедансная спектроскопия электрохимических материалов: Учебное пособие / Е.С. Буянова, Емельянова Ю.В. - Екатеринбург, УрГУ, 2008. 70 с.
2. T. Kulova. All Solid State Thin-Film Lithium-Ion Batteries. Materials, Technology, and Diagnostics: monography / T. Kulova, A. Mironenko, A.Rudy, A. Skundin. CRC Press. Taylor & Francis Group, Boca Raton, London, New York. 2021. 200 p.

б) дополнительная литература

1. Andrzej Lasia. 2014. Electrochemical Impedance Spectroscopy and Its Applications. Springer New York, Heidelberg, Dordrecht, London, 367 p.
2. Электрохимический импеданс/ З.Б. Стойнов, Б.М. Графов, Б.С. Савова, Стойнова, В.В. Елкин. - М.: «Наука», 1991. – 336 с.
3. Evgenij Barsoukov, Ross, J. Macdonald (eds). 2005. Impedance Spectroscopy Theory, Experiment, and Applications. Second Edition. John Wiley & Sons, Inc. Publication. 595 pp.

в) ресурсы сети «Интернет»

1. Электронный университет Moodle ЯрГУ – Электронное учебно-методическое пособие «Методы исследования материалов для твердотельных ЛИА»

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

Аудитории, оборудованные для проведения лекций, лабораторных работ, практических, занятий и консультаций, фонд библиотеки, компьютерная техника.

Автор:

Заведующий базовой кафедрой
нанотехнологий в электронике
в ЯФ ФГБУН ФТИАН им. К. А. Валиева РАН
профессор, д.ф.-м.н.

_____ А.С. Рудый
(подпись)

**Приложение №1 к рабочей программе дисциплины
«Теория и методы электрохимической импеданс-спектроскопии»**

**Фонд оценочных средств
для проведения текущей и промежуточной аттестации студентов
по дисциплине**

**1. Типовые контрольные задания или иные материалы,
необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности,
характеризующих этапы формирования компетенций**

**1.1 Контрольные задания и иные материалы,
используемые в процессе текущей аттестации**

Задания для самостоятельной работы:

1. Понятие импеданса, адмиттанса. Соотношения, связывающие импеданс и адмиттанс электрохимической системы.
3. Способы представления импеданса и адмиттанса на фазовой плоскости. Параметрическая запись уравнений, диаграммы Найквиста и Боде.
4. Импеданс и адмиттанс последовательного соединения сопротивления и емкости, параллельного соединения сопротивления и емкости, последовательного соединения сопротивлений и параллельного соединения емкости.
5. Структура и модели двойного электрического слоя.
6. Диффузионные элементы, используемые в электрохимической импеданс-спектроскопии.
7. Элемент постоянной фазы и его связь с идеальными структурными элементами.
8. Обобщенные диффузионные элементы.
9. Способы измерения импеданса, достоинства, недостатки.
10. Нелинейная импеданс-спектроскопия.

Список вопросов к зачету:

1. Закон Ома. Постоянный и переменный электрический ток. Основные характеристики постоянного и переменного тока.
2. Комплексные числа. Представление комплексного числа на комплексной плоскости.
3. Представление электрического сопротивления в комплексной форме
4. Представление импеданса на фазовой плоскости.
5. Импеданс цепи структурных элементов с сосредоточенными параметрами.
6. Вывод уравнения для импеданса RLC-цепочки.
7. Классический и структурный подходы к изучению электрохимических систем.
8. Модель идеально поляризуемого электрода.
9. Электрод с фарадеевским процессом. Эквивалентная схема электролита с двумя платиновыми электродами при наличии фарадеевского процесса.
10. Принцип метода спектроскопии импеданса. Этапы развития теории электрохимического импеданса.
11. Определение эквивалентной электрической схемы.
12. Основные компоненты структурной модели. Примеры структурных моделей.
14. Импеданс Варбурга
15. Импеданс Геришера

16. Элемент постоянной фазы.
17. Обобщенный элемент Варбурга
18. Обобщенный элемент Геришера
19. Методы измерения электрохимического импеданса.
20. Какие диффузионные элементы вы знаете?
21. Чем отличается элемент Варбурга от элемента Геришера.
22. Как учитывается объемная емкость электрохимической ячейки в эквивалентной схеме?
23. Физический смысл величин R , C , L , W , BW , CPE , BCP .

Правила выставления зачета.

При сдаче зачета студент отвечает на один теоретический вопрос. На подготовку к ответу дается не менее 1 часа. Оценка «Зачтено» выставляется студенту, который дает полные и последовательные ответы на вопросы по темам, при этом демонстрирует умение выделить существенные и несущественные признаки и установить причинно-следственные связи. При этом допускаются ошибки в определении и раскрытии некоторых основных понятий, формулировке положений, которые студент затрудняется исправить самостоятельно. При аргументации ответа студент не обосновывает свои суждения. На часть дополнительных вопросов студент затрудняется дать ответ или дает неверные ответы.

Оценка «Незачтено» выставляется студенту, который демонстрирует разрозненные, бессистемные знания; беспорядочно и неуверенно излагает материал; не умеет выделять главное и второстепенное, не умеет соединять теоретические положения с практикой, не устанавливает межпредметные связи; допускает грубые ошибки при определении сущности раскрываемых понятий, явлений, вследствие непонимания их существенных и несущественных признаков и связей; дает неполные ответы, логика и последовательность изложения которых имеют существенные и принципиальные нарушения, в ответах отсутствуют выводы. Дополнительные и уточняющие вопросы экзаменатора не приводят к коррекции ответов студента. На основную часть дополнительных вопросов студент затрудняется дать ответ или дает неверные ответы.

Приложение №2 к рабочей программе дисциплины
«Теория и методы электрохимической импеданс-спектроскопии»
(наименование дисциплины)

Методические указания для студентов по освоению дисциплины

Основной формой изложения материала по дисциплине «Теория и методы электрохимической импеданс-спектроскопии» являются лекции в объеме 36 часов. Это связано с необходимостью изучения разделов стандартного курса электрохимической импеданс-спектроскопии, написанное на языке физики твердого тела и физики полупроводников.

Для успешного освоения дисциплины важно выполнение практических заданий студентами, а также их самостоятельная работа дома. Рекомендуется регулярное повторение пройденного материала и чтение рекомендованной литературы.

В конце семестра студенты сдают зачет, который проводится в форме опроса по списку вопросов.

Учебно-методическое обеспечение
самостоятельной работы студентов по дисциплине

а) основная литература

1. Е.С. Буянова. Импедансная спектроскопия электрохимических материалов: Учебное пособие / Е.С. Буянова, Емельянова Ю.В. - Екатеринбург, УрГУ, 2008. 70 с.
2. T. Kulova. All Solid State Thin-Film Lithium-Ion Batteries. Materials, Technology, and Diagnostics: monography / T. Kulova, A. Mironenko, A. Rudy, A. Skundin. CRC Press. Taylor & Francis Group, Boca Raton, London, New York. 2021. 200 p.

б) дополнительная литература

1. Andrzej Lasia. 2014. Electrochemical Impedance Spectroscopy and Its Applications. Springer New York, Heidelberg, Dordrecht, London, 367 p.
2. Электрохимический импеданс/ З.Б. Стойнов, Б.М. Графов, Б.С. Савова, Стойнова, В.В. Елкин. - М.: «Наука», 1991. – 336 с.
3. Evgenij Barsoukov, Ross, J. Macdonald (eds). 2005. Impedance Spectroscopy Theory, Experiment, and Applications. Second Edition. John Wiley & Sons, Inc. Publication. 595 pp.

в) ресурсы сети «Интернет»

1. Электронный университет Moodle ЯрГУ – Электронное учебно-методическое пособие «Методы исследования материалов для твердотельных ЛИА»