

**Программа**  
**краткосрочного повышения квалификации преподавателей и научных работников высшей школы**  
**по направлению**  
**«Методы диагностики и исследования наноструктур»**  
**на базе учебного курса**

**«Оже-электронная спектроскопия»**

Цель: изучение физических принципов Оже-электронной спектроскопии

Категория слушателей: преподаватели и научные работники высшей школы

Срок обучения: 36 часов

Форма обучения: с частичным отрывом от работы

Режим занятий: 6 часов в день

*Целью изучения курса* является получение фундаментальных знаний в области электронно-спектроскопических исследований свойств наноматериалов – области знаний, имеющей большое значение для современного материаловедения, физики наноразмерных и молекулярных структур, физики и химии конденсированного состояния и тонких пленок. Задачи курса состоят в изучении физических основ метода Оже-электронной спектроскопии и его применения для исследования наноструктур и поверхности твердого тела.

**Требования к уровню освоения учебного курса**

Преподаватели должны:

- Знать:
  - область применения Оже-электронная спектроскопия(ОЭС);
  - физические принципы методики ОЭС;
  - устройство оборудования для проведения исследований методами ОЭС;
  - структуру спектров ОЭС
- Иметь навыки:
  - сбора, систематизации и анализа научно-технической и другой профессиональной информации в области применения ОЭС;
  - включать приобретенные знания о ОЭС в уже имеющуюся систему знаний и применять эти знания в самостоятельных методических разработках;
  - переносить полученных знания о ОЭС на смежные предметные области и к использованию этих знаний для построения междисциплинарных методических разработок.
- Иметь представление:
  - о методике ОЭС;
  - о процедуре получения спектров с помощью ОЭС;
  - Использование метода ОЭС в исследовании наноструктур .

Научные работники должны:

- 1. Знать:
  - область применения Оже-электронная спектроскопия (ОЭС);
  - физические принципы ОЭС;
  - устройство оборудования для проведения исследований методом ОЭС;
- Иметь навыки:
  - сбора, систематизации и анализа научно-технической и другой профессиональной информации в области применения ОЭС;
  - включать приобретенные знания о ОЭС в уже имеющуюся систему знаний и применять эти знания в самостоятельных методических разработках;
  - переносить полученных знания о ОЭС на смежные предметные области и к использованию этих знаний для построения междисциплинарных методических разработок.
- Иметь представление:
  - о методике ОЭС;

- о процедуре получения спектров с помощью ОЭС;
- Использование метода ОЭС в исследовании наноструктур .

Учебный курс «Оже-электронная спектроскопия» состоит из дистанционной и очной частей.

Дистанционная часть учебного образовательного курса обеспечивает слушателя необходимым объемом знаний по выбранной тематике. Задача дистанционной составляющей учебного курса – подготовить слушателя к очному посещению лаборатории в Московском инженерно-физическом институте.

В дистанционной (теоретической) части учебного курса изложены физические основы метода Оже-электронная спектроскопия (ОЭС). Теоретическая часть учебного курса состоит из семи лекций:

### **Лекция 1. Введение.**

Классификация методов исследования наноструктур и поверхности твердого тела. Сверхвысокий вакуум. Физическая и химическая адсорбция. Основные характеристики СВВ систем для анализа поверхности.

### **Лекция 2. Общие замечания и историческая справка.**

Историческая справка. Отличительные особенности метода ОЭС. Физические основы ОЭС. Обзорный спектр ОЭС.

### **Лекция 3. Кинетическая энергия оже-электрона. Форма и структура оже-электронных спектров.**

Различные способы расчета кинетической энергии оже-электрона. Ширина и интенсивность линий оже-электронных спектров. Тонкая структура оже-электронных спектров.

### **Лекция 4. Интенсивность оже-электронных линий. Анализ оже-электронных спектров.**

Интенсивность спектральных линий оже-электронов. Сечение ионизации. Количественный анализ оже-электронных спектров. Отношение концентраций двух элементов в анализируемом слое образца.

### **Лекция 5. Экспериментальная установка. Метод ОЭС в исследовании наноструктур.**

Аппаратура для ОЭС. Использование метода ОЭС в исследовании наноструктур и поверхности твердого тела. Сравнение характеристик ОЭС и РФЭС. Преимущества метода ОЭС.

Очная (экспериментальная) часть учебного курса заключается в ознакомлении со спектрометром XSAM-800 и программой обработки РФЭ спектров. Обзорные спектры. Идентификация элементов. Расчет в простейшей модели значения кинетической энергии всех возможных оже-электронов. Основные задания на лабораторный практикум:

1. Установить и научиться работать с программой просмотра и обработки спектров Vieweg на примере выданного файла обзорного и частичного спектров пленки молибдена, осажденной на поверхность высокоориентированного пиролизованного графита (Mo/ВОПГ). Научиться определять положение спектральных линий, фиттировать спектральные линии функцией Гаусса, определять их основные характеристики (интенсивность и ширину на полувысоте).
2. Для выданного спектра известного элемента с использованием справочных данных выписать его электронную структуру (набор атомных электронных уровней). Идентифицировать его спектральные уровни (фотоэлектронные и оже-электронные пики) и определить их энергию связи/кинетическую энергию. Рассчитать в простейшей модели значения кинетической энергии всех возможных оже-электронов, рождающихся в результате фотоионизации указанного основного XXX уровня данного

элемента. Сравнить расчетные и экспериментальные значения КЕ наблюдаемых в спектре линий оже-переходов.

## Методические рекомендации по реализации учебной программы

На дистанционную и очную части учебного курса отводится по 18 часов соответственно. Полное содержание лекций в электронной дистанционной части учебного курса находится на сайте [www.nanoobr.ru](http://www.nanoobr.ru). Для контроля степени освоения теоретической части учебного курса (лекций) используются тестовые вопросы для самопроверки и контрольные вопросы.

### Тестовые вопросы к курсу

«Оже-электронная спектроскопия»

#### Лекция 1: Введение.

1. С помощью каких методов можно исследовать элементный состав наноструктур?

- |  |   |
|--|---|
| А) ПТСРСП(или EXAFS, протяженная тонкая структура рентгеновского спектра поглощения), ОЭС(оже-электронная спектроскопия) | Б) СРМИ(спектроскопия рассеяния медленных ионов), ПЭМ(просвечивающая электронная микроскопия) |
| В) МСМ(магнитно-силовая микроскопия), СТМ(сканирующая туннельная микроскопия)  | Г) ПЭМ(полевая эмиссионная микроскопия), УФЭС(ультрафиолетовая фотоэлектронная спектроскопия) |

2. Назовите недостаток получения атомарно-чистой поверхности методом травления поверхности ионами благородных газов.

- |  |   |
|--|---|
| А) Разрушение поверхности при ее бомбардировке энергетичными ионами (с энергией в сотни эВ). | Б) Образование дефектов, а также частичное внедрение ионов в приповерхностные слои образца. |
| В) Ограниченность определенным типом материалов (не подходит для металлов).                  | Г) Образование атомных ступенек на поверхности образца.                                     |

3. Какое давление нужно поддерживать в системе, чтобы за время эксперимента (1 час) на поверхности адсорбировалось не более одной десятой доли монослоя (коэффициент прилипания  $S=0.1$ )?

- |                             |                             |
|-----------------------------|-----------------------------|
| А) Не ниже $10^{(-8)}$ Торр | Б) Не ниже $10^{(-6)}$ Торр |
| В) Не ниже $10^{(-8)}$ Па   |                             |

#### Лекция 2: Общие замечания и историческая справка.

1. Какая рекомбинация преобладает при энергии ионизации (энергии связи)  $BE_j < 10$  кэВ?

- |                                |  |
|--------------------------------|--|
| А) Излучательная рекомбинация. | Б) Безызлучательная, или оже-рекомбинация. |
|--------------------------------|--|

2. Какие области спектра ОЭС могут быть использованы для характеристики чистоты поверхности образца?

А) Оже-электронные пики небольшой интенсивности

Б) Низкоэнергетичный пик неупруго рассеянных первичных и вторичных электронов.

В) Пик упруго рассеянных поверхностью первичных электронов.

Г) Сателлиты пика упруго-рассеянных первичных электронов, плазмонные сателлиты.

3. Электронные пучки какой энергии и интенсивности в основном используются в ОЭС?

А)  $E \sim 5 \div 15.0$  кэВ;  $I \sim 10 \div 1000$   $\mu$ А

Б)  $E \sim 1.5 \div 5.0$  кэВ;  $I \sim 1 \div 100$   $\mu$ А

В)  $E \sim 1.5 \div 5.0$  эВ;  $I \sim 1 \div 100$   $\mu$ А

Г)  $E \sim 10 \div 500$  эВ;  $I \sim 1 \div 10$   $\mu$ А

### **Лекция 3: Кинетическая энергия оже-электрона. Форма и структура оже-электронных спектров.**

1. Ширина оже-электронных линий определяется только приборным уширением.

А) Верно

Б) Неверно.

2. В оже-электронных спектрах наблюдаются

эффекты тонкой структуры: химический и размерный сдвиг линии, спин-орбитальное и мультиплетное расщепление, сателлиты.

А) Верно

Б) Неверно

### **Лекция 4. Интенсивность оже-электронных линий. Анализ оже-электронных спектров.**

1. Какой глубиной характеризуется область выхода оже-электронов?

А) 1-2 мкм

Б) 100 ангстрем

В) 3-4 ангстрема

Г) 10 ангстрем

2. Что является основными параметрами, определяющими различие интенсивностей линий оже-электронов в спектрах?

А) Сечение ионизации элемента.

Б) Масса элемента.

В) Концентрация элемента в исследуемом образце.

Г) Валентность элемента.

2. В ОЭС анализируются спектры оже-электронов, рожденных в результате оже-переходов с участием основного ионизованного уровня с энергией связи  $BE_j \leq 1.0 \div 1.5$  кэВ.

А) Верно

Б) Неверно

## Лекция 5. Экспериментальная установка. Метод ОЭС в исследовании наноструктур.

1. Какие характеристики разнятся у методов исследования поверхности РФЭС и ОЭС?
  - А) Качественный анализ.
  - Б) Пространственное разрешение
  - В) Глубина анализируемого слоя
  - Г) Относительная чувствительность.
2. Пространственное разрешение метода ОЭС соответствует разрешению современных РФЭС-спектрометров.
  - А) Верно
  - Б) Неверно
2. Использование метода ОЭС оправдано для:
  - А) Проведения анализа элементного и химического состава образца.
  - Б) Экспресс-исследования атомной структуры образца.
  - В) Исследования тонких электронных эффектов
  - Г) Получения карты распределения элементов по поверхности образца.

### Контрольные вопросы для проверки материала в количестве 26 вопросов

1. Оценить время заполнения поверхности при нормальных условиях до 1 mL
2. Физический смысл соотношения  $n_{\text{адс.}} \sqrt{m} \approx \epsilon$  (экспозиция)
3. Показать необходимость использования сверхвысокого вакуума (СВВ)
4. Требования к средствам получения СВВ
5. Методики исследования электронных свойств поверхности наноструктур
6. Объясните различие измерения энергии связи в металлах и полупроводниках в РФЭС
7. Каков принцип работы полусферического анализатора
8. Что такое оже-эффект
9. Назовите виды оже-спектроскопии, различающиеся по способу ионизации основного уровня
10. Назовите характерные особенности метода ОЭС
11. Прокомментируйте переходы  $KL_{45}L_{45}$
12. Зачем нужен электронный пучок при возбуждении безизлучательных (оже) переходов
13. Назовите характерные значения энергии первичных электронов, используемых в оже-электронной спектроскопии
14. Для каких элементов (z) наибольшее сечение возбуждения оже переходов
15. В чем преимущество дифференциального представления оже-спектров
16. Чем определяется кинетическая энергия оже-электрона
17. Почему для CVV оже-переходов ширина спектральных линий обычно больше, чем для ССС переходов
18. От чего зависит интенсивность оже-электронных линий
19. Можно ли наблюдать оже-электронные спектры лития в газовой фазе и почему
20. Чем определяется тонкая структура ОЭС
21. Сечение ионизации электронной оболочки атома электронным ударом
22. Чем определяется интенсивность ОЭС линии
23. Каково пространственное разрешение метода ОЭС
24. Что такое процесс КостераКронига (КК)

26. Почему спектры (КК) чувствительны к металл - неметалл переходу в наноструктурах

В конце очной части учебного курса слушатели готовят отчеты по **темам контрольных рефератов**, которые используются для контроля степени усвоения всего учебного курса с применением знаний из дистанционной части курса.

**Темы контрольных рефератов по курсу  
«Оже-электронная спектроскопия»**

1. Методы исследования наноструктур и поверхностей твердых тел.
2. История развития метода Оже-электронной спектроскопии и его физические принципы.
3. Методика и последовательность проведения экспериментов по ОЭС.
4. Качественный анализ спектров
5. Количественный анализ спектров

**Учебно-тематический план**

№	Название учебного курса и лекций	Всего, час.	в том числе (указать часы)			Форма контроля
			Дистанционные лекции (самостоятельное изучение, дистанционное общение с преподавателем, вопросы-ответы через email, форум, чат и др.)	Самостоятельная работа. Подготовка ответов на контрольные вопросы	Очный практикум или другое практическое задание	
	<u>«Оже-электронная спектроскопия»</u>	36 ч.	14 ч.	4 ч.	18 ч.	Контрольные вопросы (электронная зачётка)  Реферат
1.	Лекция 1: Введение		2.8 ч.	0,8 ч.		
2.	Лекция 2: Общие замечания и историческая справка.		2.8 ч.	0,8 ч.		
3.	Лекция 3: Кинетическая энергия оже-электрона. Форма и структура оже-электронных спектров.		2.8 ч.	0,8 ч.		
4.	Лекция 4: Интенсивность оже-электронных линий. Анализ оже-электронных спектров.		2.8 ч.	0,8 ч.		
5.	Лекция 5: Экспериментальная установка. Метод ОЭС в исследовании наноструктур.		2.8 ч.	0,8 ч.		
Итоговый контроль				Контрольные вопросы (электронная зачётка)	Реферат	

**Список литературы (основной и дополнительной),  
а также других видов учебно-методологических материалов и пособий,  
необходимых для изучения (конспектов лекций, видеолекций, лазерных  
дисков и др.).**

**Список литературы  
и др. дополнительных источников информации в кол-ве – 6.**

1. *Методы анализа поверхности*, под ред. А. Зандерны, - М.: Мир, 1979.
2. Д. Вудраф, Т. Делчар, *Современные методы исследования поверхности*, - М.: Мир, 1989.
3. *Электронная и ионная спектроскопия твердых тел*, под ред. Л. Фирмэнса, Дж. Вэнника, В. Декейсера. - М.: Мир, 1981.
4. В.В. Немошкаленко, В.Г. Алешин, *Электронная спектроскопия кристаллов*, - Киев: Наукова думка, 1976.
5. Д. Бриггс, М.П. Сих, *Анализ поверхности методами оже-электронной и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии*, - М.: Мир, 1987.
6. В.Д. Борман, А.П. Менушенков, М.А. Пушкин, В.И. Троян В.Н. Тронин, *Физические основы методов исследования электронных свойств и локальной структуры функциональных наноматериалов для энергетики*, - Москва, 2009.

**Полное содержание лекций в электронной дистанционной части учебного курса на сайте [www.nanoobr.ru](http://www.nanoobr.ru)**