

**Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»**

Направление подготовки/специальность: 11.04.04 Электроника и нанoeлектроника

Наименование образовательной программы: Твердотельная микро- и нанoeлектроника

Уровень образования: высшее образование - магистратура

Форма обучения: Очная

**Оценочные материалы
по дисциплине
Современные методы исследования поверхности полупроводников**

**Москва
2023**

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ РАЗРАБОТАЛ:

Преподаватель

(должность)

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Баринов А.Д.
	Идентификатор	Ra98e1318-BarinovAD-f138ec4f

(подпись)

А.Д. Баринов

(расшифровка
подписи)

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель
образовательной
программы

(должность, ученая степень,
ученое звание)

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Баринов А.Д.
	Идентификатор	Ra98e1318-BarinovAD-f138ec4f

(подпись)

А.Д. Баринов

(расшифровка подписи)

Заведующий
выпускающей
кафедры

(должность, ученая степень,
ученое звание)

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Мирошникова И.Н.
	Идентификатор	Rd1db27a5-MiroshnikovaIN-70cafb8

(подпись)

И.Н.

Мирошникова

(расшифровка подписи)

ОБЩАЯ ЧАСТЬ

Оценочные материалы по дисциплине предназначены для оценки: достижения обучающимися запланированных результатов обучения по дисциплине, этапа формирования запланированных компетенций и уровня освоения дисциплины.

Оценочные материалы по дисциплине включают оценочные средства для проведения мероприятий текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации.

Формируемые у обучающегося компетенции:

1. ПК-1 Способен участвовать в проектировании полупроводниковых приборов и / или интегральных схем

ИД-2 Демонстрирует знание методов контроля производства и исследования полупроводниковых структур

и включает:

для текущего контроля успеваемости:

Форма реализации:

1. Расчётное задание по теме "Рентгеноспектральный микроанализ" (Расчетно-графическая работа)

Форма реализации: Билеты (письменный опрос)

1. Контрольная работа по теме: «Ионная спектроскопия» (Контрольная работа)

2. Контрольная работа по теме: «Электронная спектроскопия» (Контрольная работа)

Форма реализации: Компьютерное задание

1. Расчётное задание по теме "Резерфордовское обратное рассеяние" (Расчетно-графическая работа)

БРС дисциплины

3 семестр

Раздел дисциплины	Веса контрольных мероприятий, %				
	Индекс КМ:	КМ-1	КМ-2	КМ-3	КМ-4
	Срок КМ:	4	8	10	14
Фундаментальные и прикладные проблемы физики поверхности твёрдого тела					
Поверхность			+		
Вакуум			+		
Классификация аналитических методов исследования поверхности			+		
Ионная спектроскопия					
Методы ионной спектроскопии		+	+		+
Масс-спектроскопия вторичных ионов		+	+		+

Электронная и рентгеновская спектроскопии				
Методы электронной спектроскопии			+	
Методы рентгеновской спектроскопии			+	
Перспективные методы анализа. Сравнительный анализ методов				
Перспективные методы анализа	+			
Вес КМ:	20	30	20	30

\$Общая часть/Для промежуточной аттестации\$

СОДЕРЖАНИЕ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ

I. Оценочные средства для оценки запланированных результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с индикаторами достижения компетенций

Индекс компетенции	Индикатор	Запланированные результаты обучения по дисциплине	Контрольная точка
ПК-1	ИД-2ПК-1 Демонстрирует знание методов контроля производства и исследования полупроводниковых структур	<p>Знать:</p> <p>физические основы и аппаратную реализацию ионных методов исследования поверхности полупроводников и тонких плёнок</p> <p>физические основы и аппаратную реализацию электронных и рентгеновских методов исследования поверхности полупроводников и тонких плёнок</p> <p>Уметь:</p> <p>проводить анализ и расчёт параметров для ионной спектроскопии</p> <p>проводить анализ и расчёт параметров для электронной и рентгеновской спектроскопий</p>	<p>Контрольная работа по теме: «Ионная спектроскопия» (Контрольная работа)</p> <p>Расчётное задание по теме "Резерфордское обратное рассеяние" (Расчетно-графическая работа)</p> <p>Контрольная работа по теме: «Электронная спектроскопия» (Контрольная работа)</p> <p>Расчётное задание по теме "Рентгеноспектральный микроанализ" (Расчетно-графическая работа)</p>

II. Содержание оценочных средств. Шкала и критерии оценивания

КМ-1. Контрольная работа по теме: «Ионная спектроскопия»

Формы реализации: Билеты (письменный опрос)

Тип контрольного мероприятия: Контрольная работа

Вес контрольного мероприятия в БРС: 20

Процедура проведения контрольного мероприятия: В билете 4 вопроса: три теоретических и один практический. Теоретическую часть студент пишет на бумаге, а практическую решает с использованием компьютера

Краткое содержание задания:

Ответьте на вопросы билета

Контрольные вопросы/задания:

<p>Знать: физические основы и аппаратную реализацию ионных методов исследования поверхности полупроводников и тонких плёнок</p>	<ol style="list-style-type: none">1. <i>Дифференциальным сечением рассеяния</i> называют Чем оно отличается от <i>полного сечения рассеяния</i>?2. Почему чувствительность к тяжёлым элементам в спектроскопии ионного рассеяния выше, чем к лёгким?3. Поясните принцип работы квадрупольного масс-анализатора.4. Что называют явлением <i>затенения</i> и «<i>конусом тени</i>» в спектроскопии ионного рассеяния?5. Чем обусловлена поверхностная чувствительность в спектроскопии рассеяния медленных ионов (СРМИ)?6. Поясните принцип работы время-пролётного масс-анализатора.7. Поясните принцип работы электростатического анализатора.8. Почему количественный анализ в методе вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС) затруднителен?9. <i>Прицельным параметром</i> называют Угол рассеяния будет выше у частицы, летящей с большим или меньшим прицельным параметром? Поясните ответ.10. Поясните принцип работы магнитного масс-анализатора.11. С чем связано наличие ограничения применения формулы Резерфорда для сечения рассеяния при низких и высоких энергиях?12. Что называют «<i>каналированием</i>»?
<p>Уметь: проводить анализ и расчёт параметров для ионной спектроскопии</p>	<ol style="list-style-type: none">1. Оцените минимальное поверхностное содержание бора (атом/см²) в монокристаллическом кремнии, определяемое методом резерфордовского обратного рассеяния (РОР), которое может быть обнаружено с помощью детектора площадью 1 см², расположенного под углом рассеяния 170° на

	<p>расстоянии 5 см от мишени. Считать, что порог регистрации составляет 100 событий в час (ионов в час); величина тока ионов 4He^+ с энергией 1,5 МэВ равна 10 мкА (плотность тока 10 мА/см²). Сравните полученный результат с плотностью атомов монослоя (порядка 10^{15} атом/см²) – во сколько раз больше или меньше. <i>Обратите внимание: длительность проведения эксперимента неизвестна. Для удобства рекомендуется изобразить схему эксперимента.</i></p> <p>2. На ситалловую подложку нанесли плёнку аморфного кремния $a\text{-Si}$ толщиной 0,5 мкм. Поверхность плёнки бомбардируют ионами 16O^+ и 40Ar^+ с энергией 50 кэВ. Достигнут ли ионы подложки? Плотность аморфного кремния принять равной 2,33 г/см³. <i>Для удобства рекомендуется изобразить схему эксперимента.</i></p> <p>3. Оцените скорость потерь энергии [$\text{эВ}/\text{А}$] и сечение торможения ϵ [$\text{эВ}\cdot\text{см}^2/(10^{15}\text{ ат})$] для ионов 4He^+ с энергией 1 МэВ в соединении SiGe, нанесённом на кремниевую подложку. Какую энергию будут иметь обратно рассеянные от атомов поверхности подложки ионы при толщине плёнки 0,1 мкм (угол рассеяния 170°)? Плотность мишени принять равной 3,83 г/см³. <i>Для удобства рекомендуется изобразить схему эксперимента.</i></p> <p>4. Поверхность антимонида индия InAs бомбардируют ионами аргона 40Ar^+ с энергией 3 кэВ при плотности тока 7 мкА/см². Время травления составляет 5 минут. Определите толщину протравленного слоя. Энергию связи атомов с поверхностью принять равной 3 эВ. Плотность InAs принять равной 5,8 г/см³, молярную массу – 236,6 г/моль. Поправочный множитель α принять равным 0,25. <i>При расчёте коэффициента S_n рекомендуется использовать усреднённые массы и заряды для параметров мишени. Для удобства рекомендуется изобразить схему эксперимента.</i></p>
--	--

Описание шкалы оценивания:

Оценка: 5

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "отлично" выставляется если задание выполнено в полном объеме или выполнено преимущественно верно

Оценка: 4

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "хорошо" выставляется если большинство вопросов раскрыто. выбрано верное направление для решения задач

Оценка: 3

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "удовлетворительно" выставляется если задание преимущественно выполнено

КМ-2. Расчётное задание по теме "Резерфордовское обратное рассеяние"

Формы реализации: Компьютерное задание

Тип контрольного мероприятия: Расчетно-графическая работа

Вес контрольного мероприятия в БРС: 30

Процедура проведения контрольного мероприятия: Задание выполняется на компьютере

Краткое содержание задания:

Ионы гелия 4He^+ с энергией 2 МэВ бомбардируют поверхность плёнки толщиной t , мкм, покрытой с обеих сторон монослоем металла (наличием подложки пренебречь).

Выполнить:

1. Постройте кривые зависимости сечения торможения от энергии иона для каждого из элементов плёнки, а также для материала самой плёнки на одном графике в диапазоне энергий от 0,5 до 3 МэВ.
2. Постройте спектр обратного рассеяния, укажите особенности спектра (начало, конец, высоту и ширину).

Контрольные вопросы/задания:

Уметь: проводить анализ и расчёт параметров для ионной спектроскопии	1. Постройте спектр обратного рассеяния
--	---

Описание шкалы оценивания:

Оценка: 5

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "отлично" выставляется если задание выполнено в полном объеме или выполнено преимущественно верно

Оценка: 4

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "хорошо" выставляется если большинство вопросов раскрыто. выбрано верное направление для решения задач

Оценка: 3

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "удовлетворительно" выставляется если задание преимущественно выполнено

КМ-3. Контрольная работа по теме: «Электронная спектроскопия»

Формы реализации: Билеты (письменный опрос)

Тип контрольного мероприятия: Контрольная работа

Вес контрольного мероприятия в БРС: 20

Процедура проведения контрольного мероприятия: В билете 4 вопроса: три теоретических и один практический. Теоретическую часть студент пишет на бумаге, а практическую решает с использованием компьютера

Краткое содержание задания:

Ответьте на вопросы билета

Контрольные вопросы/задания:

Знать: физические основы и аппаратную реализацию электронных и рентгеновских методов исследования поверхности полупроводников и	1. Электронный пучок с энергией E_0 взаимодействует с поверхностью твёрдого тела. Как выглядит энергетический спектр электронов, образовавшихся в результате взаимодействия? Нарисуйте его и поясните. (10 баллов)
---	--

<p>тонких плёнок</p>	<p>2. С чем связано повышенное разрешение электронного микроскопа по сравнению с оптическим микроскопом? (15 баллов)</p> <p>3. Поясните, по какой причине Оже-электронная спектроскопия обладает поверхностной чувствительностью и чувствительностью к лёгким элементам? (25 баллов)</p> <p>4. Поясните, с какой целью в Оже-электронной спектроскопии проводят дифференцирование спектра? (15 баллов)</p> <p>5. Поясните, по какой причине рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия обладает поверхностной чувствительностью? (25 баллов)</p> <p>6. Какие Оже-переходы называют <i>переходами Костера-Кронига</i>? С чем связано увеличение ширины их спектральной линии по сравнению с обычными ССС Оже-переходами? Поясните, что такое <i>ССС Оже-переход</i>? (15 баллов)</p> <p>7. Поясните, чем определяется форма Оже- и фотоэлектронного спектров при исследовании валентной зоны полупроводникового соединения? Какую информацию и почему можно получить, проводя это исследование? (25 баллов)</p> <p>8. Нарисуйте схематически и поясните принцип работы детектора вторичных электронов типа Эверхарта-Торнли. (15 баллов)</p> <p>9. С чем связано затруднение при количественном анализе лёгких элементов методом рентгеноспектрального микроанализа? (25 баллов)</p>
<p>Уметь: проводить анализ и расчёт параметров для электронной и рентгеновской спектроскопий</p>	<p>1. Элементный состав диэлектрической мишени SixNy исследуют методом рентгеноспектрального микроанализа. Для этого поверхность облучают электронным пучком с энергией 5 кэВ и интенсивностью I_0. Детектор располагается под углом 45° к поверхности мишени. Для минимизации эффекта зарядки на поверхность напылили слой Al толщиной 10 нм. Определите, во сколько раз изменилась после напыления интенсивность рентгеновской линии SiKα? (50 баллов)</p> <p>2. Методом рентгеноспектрального микроанализа исследуют элементный состав плёнки SixGe1-x. Определите параметр x и запишите химическую формулу материала плёнки, если отношение интенсивностей линий SiKα и GeKα составляет 1:44. Указание: долю регистрируемых квантов считать одинаковой для обоих элементов, пренебречь поглощением рентгеновского излучения в окне детектора. (50 баллов)</p> <p>3. Определите, возможны ли переходы KL1L3 для He, Li, C, O, Si, W при облучении их электронным пучком с энергией 2 кэВ? Поясните ответ. (50 баллов)</p> <p>4. Какова величина средней длины свободного</p>

	пробега электрона с энергией 200 эВ и 2000 эВ в плёнке Au? Определите, при какой толщине плёнки интенсивность прошедших электронов уменьшится в 10 раз по отношению к падающим. Указание: считать, что энергию электрон теряет только на возбуждение плазмонов. (50 баллов)
--	---

Описание шкалы оценивания:

Оценка: 5

Нижний порог выполнения задания в процентах: 95

Описание характеристики выполнения знания:

Оценка: 4

Нижний порог выполнения задания в процентах: 70

Описание характеристики выполнения знания:

Оценка: 3

Нижний порог выполнения задания в процентах: 50

Описание характеристики выполнения знания:

КМ-4. Расчётное задание по теме "Рентгеноспектральный микроанализ"

Формы реализации:

Тип контрольного мероприятия: Расчетно-графическая работа

Вес контрольного мероприятия в БРС: 30

Процедура проведения контрольного мероприятия: Задание выполняется на компьютере

Краткое содержание задания:

Проводится рентгеноспектральный анализ мишени бинарного соединения $AnBm$.

1. Подобрать энергию пучка электронов исходя из величины перенапряжения для K-, L- или M-уровня тяжёлого элемента, но не более 20 кэВ.

2. Рассчитать массовый коэффициент поглощения.

3. Оценить глубину генерации рентгеновского излучения.

4. Рассчитать k -отношение и отношение интенсивностей рентгеновских линий каждого элемента.

5 (доп.). Для каждого элемента мишени построить графики зависимости массового коэффициента поглощения от энергии рентгеновского излучения в диапазоне от 1 до 30 кэВ.

Контрольные вопросы/задания:

Уметь: проводить анализ и расчёт параметров для ионной спектроскопии	1. Определите параметры рентгеноспектрального микроанализа
--	--

Описание шкалы оценивания:

Оценка: 5

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "отлично" выставляется если задание выполнено в полном объеме или выполнено преимущественно верно

Оценка: 4

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "хорошо" выставляется если большинство вопросов раскрыто. выбрано верное направление для решения задач

Оценка: 3

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "удовлетворительно" выставляется если задание преимущественно выполнено

СОДЕРЖАНИЕ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

3 семестр

Форма промежуточной аттестации: Зачет с оценкой

Пример билета

В плёнку аморфного углерода a -C вводится молибден Mo. Известно, что этот переходный металл образует два карбида: **MoC** и **Mo₂C**. У Вас есть возможность исследования плёнки методами резерфордовского обратного рассеяния (РОР), рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) и рентгеноспектрального микроанализа (РСМА). Каким из этих методов исследования Вы можете установить наличие в плёнке вида карбида молибдена (определить химическое состояние молибдена) и почему?

Процедура проведения

Задание выполняется не более 20 мин. После подготовки происходит беседа с оцениванием аргументации решения задания.

1. Перечень компетенций/индикаторов и контрольных вопросов проверки результатов освоения дисциплины

1. Компетенция/Индикатор: ИД-2_{ПК-1} Демонстрирует знание методов контроля производства и исследования полупроводниковых структур

Вопросы, задания

1. В плёнку аморфного углерода a -C вводится молибден Mo. Известно, что этот переходный металл образует два карбида: **MoC** и **Mo₂C**. У Вас есть возможность исследования плёнки методами резерфордовского обратного рассеяния (РОР), рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) и рентгеноспектрального микроанализа (РСМА). Каким из этих методов исследования Вы можете установить наличие в плёнке вида карбида молибдена (определить химическое состояние молибдена) и почему?

2. На поверхности серебра при температуре 300 К на воздухе происходит адсорбция атомов кислорода. Перед Вами стоит задача определения механизма роста слоя адсорбата (как атомы кислорода взаимодействуют с атомами серебра на поверхности, какие химические связи образуют и пр.). Каким из предложенных методов исследования Вы воспользуетесь: ультрафиолетовая фотоэлектронная спектроскопия (УФЭС), резерфордовское обратное рассеяние (РОР) или рентгеноспектральный микроанализ (РСМА)? Почему?

3. Плёнка аморфного углерода a -C гидрогенизируется (a -C:H). У Вас есть возможность исследования плёнки методами вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС), рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) и рентгеноспектрального микроанализа (РСМА). Каким из этих методов исследования Вы можете установить наличие и концентрацию атомов водорода в плёнке и почему?

4. Перед Вами стоит задача определения кристаллической структуры материала: монокристалл, поликристалл или аморфный. Есть возможность использовать спектроскопию рассеяния медленных ионов (СРМИ), дифракцию медленных электронов (ДМЭ) или рентгеновскую фотоэлектронную спектроскопию (РФЭС). Каким методом Вы воспользуетесь и почему?

5. В плёнку аморфного углерода a -C вводится хром Cr. Известно, что этот металл образует несколько карбидов: Cr_3C_2 , Cr_7C_3 и Cr_{23}C_6 . У Вас есть возможность исследования плёнки методами резерфордского обратного рассеяния (РОР), рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) и рентгеноспектрального микроанализа (РСМА). Каким из этих методов исследования Вы можете установить наличие в плёнке того или иного вида карбида хрома (определить химические связи) и почему?

6. При создании фотоприёмников на основе селенида свинца PbSe фоточувствительный слой отжигается в атмосфере йода и кислорода $\text{I}_2 + \text{O}_2$. Перед Вами стоит задача определения вхождения йода в структуру материала (образование химических связей). Вы можете использовать рентгеновскую фотоэлектронную спектроскопию (РФЭС), дифракцию быстрых электронов (ДБЭ) или вторичную ионную масс-спектрометрию (ВИМС). Каким методом и почему Вы воспользуетесь?

Материалы для проверки остаточных знаний

1. Метод резерфордского обратного рассеяния может дать информацию о ...

Ответы:

элементном составе

химическом составе

Верный ответ: элементном составе

2. Информацию о химическом составе на основе химического сдвига может дать ...

Ответы:

спектроскопия резерфордского обратного рассеяния

дифракция быстрых электронов

рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия

Верный ответ: рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия

3. Информацию о структуре материала (аморфный, поликристаллический или монокристаллический) может дать ...

Ответы:

же-электронная спектроскопия

дифракция электронов

вторичная ионная масс-спектрометрия

Верный ответ: дифракция электронов

4. Информацию о содержании кислорода в материале может дать ...

Ответы:

вторичная ионная масс-спектрометрия

же-электронная спектроскопия

атомно-силовая микроскопия

Верный ответ: вторичная ионная масс-спектрометрия

5. Информацию о расположении атомов на поверхности материала может дать ...

Ответы:

атомно-силовая микроскопия

рентгеновская фото-электронная спектроскопия

спектроскопия рентгеновского поглощения

Верный ответ: атомно-силовая микроскопия

6. Коллективные колебания электронного газа называют квазичастицами ...

Ответы:

плазмоны

фотоны

фононы

Верный ответ: плазмоны

7. Поверхностной чувствительностью обладает ...

Ответы:

рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия
рентгеноспектральный микроанализ
спектроскопия рентгеновского поглощения

Верный ответ: рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия

8.Большой разрешающей способностью обладает метод картирования элементного состава в просвечивающем электронном микроскопе метод ...

Ответы:

рентгеноспектрального микроанализа
спектроскопии характеристических потерь энергии электронами

Верный ответ: спектроскопии характеристических потерь энергии электронами

9.Исследование поверхности различными методами проводится в условиях ...

Ответы:

сверхвысокого вакуума
низкого вакуума
атмосферы

Верный ответ: сверхвысокого вакуума

10.Фотоэлектроном называют вылетевший с энергетического уровня в результате ...

Ответы:

ударной ионизации
взаимодействия с электромагнитным излучением

Верный ответ: взаимодействия с электромагнитным излучением

II. Описание шкалы оценивания

Оценка: 5

Описание характеристики выполнения знания: Работа выполнена в рамках "продвинутого" уровня. Ответы даны верно, четко сформулированные особенности практических решений

Оценка: 4

Описание характеристики выполнения знания: Работа выполнена в рамках "базового" уровня. Большинство ответов даны верно. В части материала есть незначительные недостатки

Оценка: 3

Описание характеристики выполнения знания: Работа выполнена в рамках "порогового" уровня. Основная часть задания выполнена верно. на вопросы углубленного уровня

III. Правила выставления итоговой оценки по курсу

Оценка определяется в соответствии с Положением о балльно-рейтинговой системе для студентов НИУ «МЭИ» на основании семестровой и аттестационной составляющих.