

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение  
высшего образования  
«Воронежский государственный технический университет»

УТВЕРЖДАЮ  
Декан ФРТЭ В.А. Небольсин  
«21» декабря 2021 г.



РАБОЧАЯ ПРОГРАММА  
дисциплины

«Физика и технология тонких пленок»

Направление подготовки 28.03.01 Нанотехнологии и микросистемная техника

Профиль Компоненты микро- и наносистемной техники

Квалификация выпускника бакалавр

Нормативный период обучения 4 года

Форма обучения очная

Год начала подготовки 2022

Автор программы

Янченко Л.И. /Янченко Л.И./

И.о. заведующего кафедрой  
Физики твердого тела

Калинин Ю.Е. /Калинин Ю.Е./

Руководитель ОПОП

Стогней О.В. /Стогней О.В./

Воронеж 2021

## 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

### 1.1. Цели дисциплины

формирование у студентов систематических знаний о фундаментальных принципах, определяющих структуру и физические свойства тонких пленок, а также влияющих на изменение физических свойств твердых тел при переходе к тонкопленочному состоянию, которые составляют основу подготовки специалистов в области электронной техники и физики твердого тела.

### 1.2. Задачи освоения дисциплины

освоение основных физических теорий, позволяющих описать явления в природе, и пределов применимости этих теорий для решения современных и перспективных профессиональных задач;

овладение фундаментальными принципами и методами решения научно-технических задач;

умение ориентироваться в научно-технической информации;

формирование навыков по применению положений фундаментальной теории к грамотному научному анализу ситуаций, с которыми магистру придется сталкиваться при создании или использовании новой техники и новых технологий;

умение использовать физические принципы и законы, а также результаты экспериментальных открытий в тех областях техники, в которых они будут трудиться;

ознакомление студентов с историей и логикой развития научных знаний о тонких пленках.

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОПОП

Дисциплина «Физика и технология тонких пленок» относится к дисциплинам части, формируемой участником образовательных отношений блока Б1.

## 3. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Процесс изучения дисциплины «Физика и технология тонких пленок» направлен на формирование следующих компетенций:

ПК-5 - Способен исследовать, анализировать и прогнозировать влияние различных факторов на параметры наногетероструктурных объектов и изделий.

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции
ПК-5	Знать о методах получения тонких пленок металлов, полупроводников и диэлектриков; о закономерностях и механизмах роста тонких пленок; об электрических свойствах тонких и островковых пленок; о магнитных свойствах тонких пленок; о механических свойствах тонких пленок и напряжениях, возникающих в них в процессе роста; Уметь выбирать метод, режимы и условия осаждения материала для обеспечения формирования требуемой структуры выявлять факторы, влияющие на механизм роста и структуру формирующейся пленки;

	оценивать последствия перехода в тонкопленочное состояние для физических свойств и параметров материала; проводить исследование физических свойств тонких пленок
	Владеть - навыками исследования магнитных и электрических свойств тонких пленок; - методологией прогнозирования физических свойств тонких пленок

#### 4. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ

Общая трудоемкость дисциплины «Физика и технология тонких пленок» составляет 5 з.е.

Распределение трудоемкости дисциплины по видам занятий  
**очная форма обучения**

Виды учебной работы	Всего часов	Семестры
		6
<b>Аудиторные занятия (всего)</b>	72	72
В том числе:		
Лекции	36	36
Практические занятия (ПЗ)	18	18
Лабораторные работы (ЛР)	18	18
<b>Самостоятельная работа</b>	72	72
Часы на контроль	36	36
Виды промежуточной аттестации – экзамен	+	+
Общая трудоемкость академические часы з.е.	180 5	180 5

#### 5. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

**5.1 Содержание разделов дисциплины и распределение трудоемкости по видам занятий**

**очная форма обучения**

№ п/п	Наименование темы	Содержание раздела	Лекц	Прак зан.	Лаб. зан.	СРС	Всего, Час
1	Методы получения тонких пленок	Понятие «тонкая» пленка. Размерный эффект, как проявление особенностей тонкопленочных	6	2	4	12	24

	металлов, полупроводников, диэлектриков.	материалов. Получение тонких пленок методами вакуумного и ионно-плазменного напыления. Виды методов ионно-плазменного напыления. Способы получения тонких пленок, базирующиеся на химических реакциях в газовой и твердой фазах. Химическое осаждение из газовой фазы. Рост из жидкой фазы. Твердофазные методы получения пленок.					
2	Методы контроля структуры и химического состава поверхности подложек и пленок	Способы подготовки поверхности подложек для наращивания пленок. Методы очистки подложек.	6	2	4	12	24
3	Механизмы роста пленок.	Механизмы роста пленок. Модели зародышеобразования. Критический размер и состав изотропного зародыша. Последовательность формирования сплошной пленки. Зависимость размера кристаллитов от температуры и толщины пленки. Внутренние напряжения в тонких пленках. Классификация микронапряжений. Методы определения внутренних напряжений.	6	2	4	12	24
4	Особенности физических свойств тонких пленок	Электрические свойства тонких пленок. Сплошные пленки, размерный эффект. Механизмы электропроводности островковых пленок. Тензоэффект. Высокочастотные резистивные характеристики тонких пленок. Ферромагнитные тонкие пленки. Классификация. Доменная структура тонких пленок. Процессы перемагничивания тонких пленок. Анизотропия тонких пленок.	12	8	4	24	48
5	Некоторые примеры практического	Пленочные резисторы. Пленочные конденсаторы. Тонкопленочный транзистор. Тонкопленочный диод.	6	4	2	12	24

применения тонких пленок в электронике, вычислительной технике и приборостроении	Тонкопленочные интегральные схемы. Металлизация					
<b>Итого</b>		<b>36</b>	<b>18</b>	<b>18</b>	<b>72</b>	<b>144</b>

## Лекции

№ п/п	Тема лекции	Объем часов
	<b>Раздел 1.</b> Методы получения пленок металлов, полупроводников, диэлектриков	4
1	Испарение и конденсация в вакууме. Элементарные сведения о физике процессов. Способы и техника испарения. Способы подготовки поверхностей подложек для наращивания пленок.	4
	<b>РАЗДЕЛ 2.</b> Методы контроля структуры и химического состава поверхности подложек и пленок	8
2	Методы исследования атомной структуры поверхности. Исследование морфологии поверхности подложек и пленок.	4
3	Методы исследования химического состава тонких пленок и поверхности подложек.	4
	<b>РАЗДЕЛ 3.</b> Механизмы роста пленок	8
4	Виды роста пленок при конденсации из паровой фазы. Эволюция представлений о росте пленок по механизму Фольмера и Вебера. Рост пленок по механизму Франка и Ван дер Мерве. Критическая толщина псевдоморфного слоя. Структура псевдоморфного слоя. Механизм релаксации упругих деформаций псевдоморфного слоя	4
5	Структурные превращения при росте пленок по Крастанову и Странскому. Критерии ориентированной кристаллизации пленок. Ориентированная кристаллизация пленок на неориентирующих (аморфных) подложках	4
	<b>РАЗДЕЛ 4.</b> Особенности физических свойств тонких пленок	12
6	Механические свойства пленок. Адгезия. Упругость, пластичность, прочность и микротвердость пленок. Макронапряжения. Общие закономерности поведения макронапряжений в зависимости от параметров роста и последующей термообработки пленок. Внутреннее трение и демпфирующая способность пленок.	4

7	Электропроводность пленок. Механизм электропроводности островковых конденсированных пленок металлов на диэлектрических подложках. Электропроводность сплошных пленок. Классический размерный эффект. Квантовый размерный эффект. Температурная зависимость электропроводности	4
8	Ферромагнитные пленки. Доменная структура. Процесс перемагничивания. Петля гистерезиса. Размерные эффекты некоторых свойств ферромагнитных пленок. Использование восстанавливающего действия поля анизотропии в создании элементов памяти	4
	<b>РАЗДЕЛ 5.</b> Некоторые примеры практического применения тонких пленок в электронике, вычислительной технике и приборостроении	4
9	Пленочные резисторы. Пленочные конденсаторы. Тонкопленочный транзистор. Тонкопленочный диод. Тонкопленочные интегральные схемы. Металлизация.	4
Итого часов		36

### Практические занятия

№ п/п	Тема практического занятия	Объем часов	Форма контроля
	<b>Раздел 1. Методы получения пленок металлов, полупроводников, диэлектриков</b>	4	
1	Ионное распыление. Ионно-плазменное (катодное) распыление. Ионно-лучевое распыление.	2	Доклад на семинаре
2	Химические методы получения пленок. Химическое осаждение из газовой фазы	2	Реферат
	<b>РАЗДЕЛ 2.</b> Методы контроля структуры и химического состава поверхности подложек и пленок	4	
3	Дифракция медленных электронов. Дифракция быстрых электронов. Просвечивающая электронная микроскопия. Электронно-зондовый микроанализ.	2	Доклад на семинаре
4	Электронная Оже-спектроскопия, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, вторично-ионная масс-спектрометрия.	2	Реферат
	<b>РАЗДЕЛ 3.</b> Механизмы роста пленок	4	
5	Теоретические модели образования зародышей. Капиллярная модель. Атомистическая модель.	4	Реферат

	Кинетика зарождения. Метод кинетических уравнений. Кинетика роста свободных островков. Рост изолированного островка. Рост островков в ансамбле. Кинетика поздних стадий роста пленки. Влияние дефектов подложки		
	<b>РАЗДЕЛ 4.</b> Особенности физических свойств тонких пленок	4	
6	Гальваномагнитный размерный эффект. Эффект Холла. Тензoeffект островковых пленок. Сверхпроводимость пленок. Критическая температура. Критическое поле. Критический ток тонких пленок. Размерный эффект проводимости пленок полупроводников.	2	Реферат
7	Теплофизические свойства тонких пленок. Методы исследования. Тепловое расширение. Излучательная способность. Теплопроводность. Температуропроводность. Теплоемкость	2	Реферат.
8	Массоперенос в тонких пленках. Диффузия в тонких пленках. Электромиграция в пленочных проводниках	2	Доклад на семинаре
	<b>РАЗДЕЛ 5.</b> Некоторые примеры практического применения тонких пленок в электронике, вычислительной технике и приборостроении	2	
9	Устройства на магнитных пленках, криотроны	2	Доклад на семинаре
Итого часов		18	

## 5.2 Перечень лабораторных работ

### СЕМЕСТР 6

№ п/п	Наименование лабораторной работы	Объем Часов	Форма контроля
<b>РАЗДЕЛ 1.</b> Методы получения пленок металлов, полупроводников, диэлектриков		4	
1	Получение тонких пленок в вакууме распылением металлических мишеней	4	Опрос, отчет
<b>РАЗДЕЛ 2.</b> Методы контроля структуры и химического состава поверхности подложек и пленок		4	

2	Определение размера гранул с помощью программы Gatan DigitalMicrograph Электронно-микроскопические исследования гетерогенных тонкопленочных структур	4	Опрос, отчет
	<b>РАЗДЕЛ 3.</b> Особенности физических свойств тонких пленок	4	
3	Исследование газовой чувствительности пленок оксидных полупроводников (In-Y-O-C).	4	Опрос, отчет
	<b>РАЗДЕЛ 4.</b> Некоторые примеры практического применения тонких пленок в электронике, вычислительной технике	4	
4	Исследование характеристик солнечных фотопреобразователей	4	Опрос, отчет
	Зачетное занятие	2	Зачет
Итого часов		18	

### Самостоятельная работа студента (СРС)

#### СЕМЕСТР6

Неделя семестра	Вид СРС	Форма контроля	Объем часов
1	Подготовка поверхности полупроводниковых кристаллов в технологии производства приборов на их основе.	Опрос	4
2	Подготовка к лабораторной работе		4
3	Рост из жидкой фазы. Осаждение из химического раствора. Твердофазные методы	Реферат	4
4	Элементы кристаллографии поверхности Атомная структура поверхности монокристаллов, диэлектриков	Семинар.	4
5	Стохастические модели роста. Вводные замечания и классификация моделей. Дискретные модели. Континуальные модели. Приложения моделей	Опрос	8
6	Подготовка к зачету по лабораторной работе	Зачет	4
7	Атомная структура и субструктура межфазных границ. Атомная структура и морфология	Опрос	4

	свободной поверхности пленок. Субструктура многослойных пленочных композиций		
8	Изучение теоретического материала	Зачет	4
9	Подготовка к коллоквиуму	Коллоквиум	8
11	Подготовка к отчету по лабораторной работе	Опрос	4
12	Классификация макронапряжений в пленках. Механизм образования. Способы измерения макронапряжений в пленках	Реферат	4
14	Подготовка к отчету по лабораторной работе	Зачет	4
15	Свойства диэлектрических пленок. Диэлектрическая проницаемость. Потери в диэлектрических пленках. Электропроводность диэлектрических пленок	Опрос	4
16	Изучение теоретического материала	Опрос	4
18	Подготовка к отчету по лабораторной работе	Зачет	8
Итого часов:			72

## **6. ПРИМЕРНАЯ ТЕМАТИКА КУРСОВЫХ ПРОЕКТОВ (РАБОТ) И КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ**

В соответствии с учебным планом освоение дисциплины не предусматривает выполнение курсового проекта (работы) или контрольной работы.

## **7. ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

**7.1. Описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования, описание шкал оценивания**

### **7.1.1 Этап текущего контроля**

Результаты текущего контроля знаний и межсессионной аттестации оцениваются по следующей системе:

«аттестован»;

«не аттестован».

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции	Критерии оценивания	Аттестован	Не аттестован
ПК-5	Знать о методах получения тонких пленок металлов, полупроводников и	Решение задач,	Выполнение работ в срок,	Невыполнение работ в срок,

	диэлектриков; озакономерностях и механизмах роста тонких пленок; об электрических свойствах тонких и островковых пленок; о магнитных свойствах тонких пленок; о механических свойствах тонких пленок и напряжениях, возникающих в них в процессе роста	выполнение лабораторных работ	предусмотренный в рабочих программах	предусмотренный в рабочих программах
	уметь выбирать метод, режимы и условия осаждения материала для обеспечения формирования требуемой структуры выявлять факторы, влияющие на механизм роста и структуру формирующейся пленки; оценивать последствия перехода в тонкопленочное состояние для физических свойств и параметров материала; проводить исследование физических свойств тонких пленок	Решение задач, выполнение лабораторных работ	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
	владеть- навыками исследования магнитных и электрических свойств тонких пленок; - методологией прогнозирования физических свойств тонких пленок	Решение задач, выполнение лабораторных работ	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах

### 7.1.2 Этап промежуточного контроля знаний

Результаты промежуточного контроля знаний оцениваются в 6 семестре для очной формы обучения по четырехбалльной системе:

«отлично»;

«хорошо»;

«удовлетворительно»;

«неудовлетворительно».

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции	Критерии оценивания	Отлично	Хорошо	Удовл.	Неудовл.
ПК-5	знать о методах получения тонких пленок металлов, полупроводников и диэлектриков; озакономерностях и механизмах роста тонких пленок; об электрических свойствах тонких и островковых пленок; о магнитных свойствах тонких пленок; о механических свойствах тонких пленок и напряжениях, возникающих в них в процессе роста	Тест	Выполнение теста на 90- 100%	Выполнение теста на 80- 90%	Выполнение теста на 70- 80%	В тесте менее 70% правильных ответов
	уметь выбирать метод, режимы и условия осаждения материала для обеспечения формирования	Решение стандартных практических	Задачи решены в полном объеме и	Продемонстрирован верный	Продемонстрирован верный	Задачи не решены

требуемой структуры выявлять факторы, влияющие на механизм роста и структуру формирующейся пленки; оценивать последствия перехода в тонкопленочное состояние для физических свойств и параметров материала; проводить исследование физических свойств тонких пленок	ких задач	получены верные ответы	ход решения всех, но не получен верный ответ во всех задачах	ход решения в большинстве задач	
Владеть - навыками исследования магнитных и электрических свойств тонких пленок; - методологией прогнозирования физических свойств тонких пленок	Решение прикладных задач в конкретной предметной области	Задачи решены в полном объеме и получены верные ответы	Продемонстрирован верный ход решения всех, но не получен верный ответ во всех задачах	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены

**7.2 Примерный перечень оценочных средств (типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности)**

**7.2.1 Примерный перечень заданий для подготовки к тестированию**

- 1 Размерный эффект можно наблюдать в
  - а) массивных объектах
  - б) тонких пленках
  - в) жидких образцах
- 2 В классификации методов получения тонких пленок отсутствуют
  - а) физические
  - б) химические
  - в) физико-химические
  - г) биологические
- 3 Образование паровой фазы и последующая конденсация из пара на поверхность подложки характерна для
  - а) физических методов
  - б) химических методов
  - в) биологических методов
- 4 К группе физических методов не относятся
  - а) диффузия
  - б) ионное легирование
  - в) электролиз из раствора или расплава
- 5 В основе химических методов получения тонких пленок лежит
  - а) химические реакции
  - б) термическое испарение
  - в) лазерная абляция
- 6 Термическое испарение и конденсация в высоком вакууме с

последующей термообработкой сконденсированной фазы в активной газовой среде является следующим способом получения тонких пленок

- а) физическим
- б) физико-химическим
- в) химическим

7 Выберите правильный критерий высокого вакуума, где  $l$  – длина свободного пробега,  $r$  – расстояние от испарителя до подложки

- а)  $l < r$
- б)  $l = r$
- в)  $l \gg r$

8 Согласно закону Ламберта

а) плотность потока от точечного источника обратно пропорциональна квадрату расстояния от испарителя

б) плотность потока от точечного источника прямо пропорциональна квадрату расстояния от испарителя

в) плотность потока от точечного источника обратно пропорциональна расстоянию от испарителя

9 Наиболее универсальной является следующая техника испарения

- а) пропускание тока через проволочный материал
- б) резистивный испаритель
- в) индукционный нагрев

10 Наиболее совершенной техникой получения тонких пленок является

- а) лазерное испарение
- б) радиационный нагрев
- в) эпитаксия из молекулярных пучков

1. Какое условие должно выполняться, для того, чтобы пленку можно было считать «тонкой»? (Критерий того, что пленка действительно является тонкой)

2. В чем основное отличие физических методов получения тонкой пленки от химических?

3. Перечислить основные стадии процесса напыления пленки физическими методами.

4. Чем «прямой нагрев» отличается от «косвенного» в методах вакуумного напыления?

5. В чем основное отличие термовакuumного метода напыления пленок от метода катодного напыления?

6. Перечислить способы с помощью которых испаряется твердое вещество в методах термо-вакуумного напыления?

7. Дать определение понятия "давление насыщенного пара".

8. Дать определение понятия "условная температура испарения".

9. Что конденсируется на поверхности подложки в методах

термо-вакуумного напыления – ионы или атомы?

10. Что является рабочей атмосферой внутри камеры в методах термо-вакуумного напыления?
11. Что такое коэффициент распыления?
12. Для чего в методах ионно-плазменного напыления используется аргон?
13. Каким образом происходит ионизация атомов аргона?
14. Что конденсируется на поверхности подложки в методах ионно-плазменного напыления – ионы или атомы?
15. Что является источником электронов в методе катодного (двух-электродного) распыления?
16. Почему газовый разряд в методе катодного распыления называется «самостоятельный тлеющий разряд»?
17. Какие процессы происходят в области «темного катодного пространства» в методе катодного распыления?
18. Как соотносятся (что больше) длина свободного пробега и расстояние мишень-подложка в методе катодного распыления?
19. Почему в методе ионно-плазменного распыления можно использовать более низкое рабочее давление по сравнению с катодным распылением?
20. Что является источником электронов в методе трехэлектродного ионно-плазменного распыления?
21. Зачем в методе ионно-плазменного распыления используют магнитное поле?
22. Какая необходимость обуславливает использование методов ВЧ-распыления? Какая проблема решается этим способом?
23. В чем особенность магнетронного распыления?
24. Почему при магнетронном распылении скорость напыления пленки более высокая по сравнению с другими методами?
25. Почему в методе магнетронного напыления возникают проблемы с распылением магнитных материалов?
26. Основная особенность реактивного напыления?
27. Какой смысл кроется в названии «реактивное»?
28. Какие материалы можно получать с помощью реактивного напыления и какая рабочая атмосфера для этого используется? (привести примеры).

### **7.2.2 Примерный перечень заданий для решения стандартных задач**

11 Расположите процессы в порядке увеличения необходимой мощности ионного потока

- а) химические реакции на поверхности

- б) вторичная ионно-электронная эмиссия
  - в) термическое испарение
  - г) травление дефектных мест
- д) тлеющий разряд
- 12 Распределение потенциала в тлеющем разряде не содержит участка
- а) темное астоново пространство
  - б) ионное легирование
  - в) отрицательное тлеющее свечение
  - г) положительный столб
- 13 Коэффициент распыления материала характеризует
- а) число выбитых из катода атомов, приходящихся на один бомбардирующий ион газа
  - б) число бомбардирующих ионов газа, приходящихся на единицу площади
  - в) число выбитых из катода атомов за единицу времени
- 14 Недостаток классического варианта катодного распыления в плазме тлеющего разряда при постоянном напряжении на электродах
- а) трудность распыления низкоомных материалов
  - б) трудность распыления полимерных материалов
  - в) трудность распыления высокоомных материалов
- 15 Назовите лишний элемент для реализации схемы ионно-лучевого распыления
- а) ионная пушка
  - б) нагреватель
  - в) мишень
- 16 Технология эпитаксиального наращивания кремния и германия относится к
- а) катодное распыление
  - б) ионно-лучевое распыление
  - в) химическое осаждение из паровой фазы
- 17 Многостадийный процесс переноса относительно нелетучего материала из зоны твердого или жидкого источника в зону подложки это
- а) реакция восстановления
  - б) газотранспортная реакция
  - в) реакция полимеризации
- 18 Электролитические покрытия получают
- а) осаждением из химического раствора
  - б) твердофазными методами
  - в) реакцией полимеризации
- 19 Каким методом наиболее просто получить чистую поверхность слюды для вакуумного процесса наращивания тонких пленок
- а) прогрев в сверхвысоком вакууме
  - б) ионная бомбардировка
  - в) расщепление слоистых минералов
- 20 В чем недостаток метода прогрева в сверхвысоком вакууме для получения чистых поверхностей для вакуумного процесса наращивания пленок

- а) раскол по плоскости спайности
- б) диффузия поверхностных загрязнений в объем образца
- в) создание макронапряжений

1. Что такое «критический зародыш»?
2. Что такое «поверхность раздела»?
3. Чем гомогенное зародышеобразование отличается от гетерогенного?
4. При гомогенном зародышеобразовании появление новой фазы (появление зародышей) приводит к изменению энергии Гиббса системы ( $\Delta G$ ). Какие слагаемые, дающие вклад в  $\Delta G$ , при этом рассматриваются? Изменение энергии за счет какого фактора рассматривает каждое слагаемое?
5. Почему при образовании новой фазы (при появлении зародышей) в объеме исходной фазы система вынуждена преодолевать потенциальный барьер? Почему существует потенциальный барьер для формирования зародышей новой фазы?
6. От чего зависит размер критического зародыша? Как можно уменьшить размер критического зародыша?
7.  $\mu$  - это химический потенциал,  $\Delta\mu$  - изменение химического потенциала системы или разность между химическим потенциалом системы в начальном состоянии (до появления зародышей новой фазы) и химическим потенциалом новой фазы. Можно ли воздействуя на систему менять величину  $\Delta\mu$ ? Если да – привести примеры.
8. Какой, примерно, размер имеют критические зародыши металла при конденсации из пара? Какой размер при кристаллизации из расплава?
9. При образовании зародыша какой формы высота потенциального барьера меньше: изотропного (сферического) или анизотропного (то есть имеющего определенную кристаллографическую огранку)?
10. При рассмотрении гетерогенного зародышеобразования, какое слагаемое добавляется в выражение для  $\Delta G$ ?
11. В каком случае высота потенциального барьера меньше: в случае гомогенного или гетерогенного зародышеобразования? От чего зависит изменение высоты барьера?
12. Появление зародыша новой фазы в системе приводит к росту энергии Гиббса, это термодинамически не выгодно. Объяснить, каким образом зародыш «умудряется» достигнуть критического размера, после чего его рост ведёт уже к уменьшению энергии.
13. Какие два механизма определяют рост зародыша новой фазы?
14. При каком механизме роста размер зародыша будет линейно пропорционален времени?
15. Что является основным фактором, влияющим на то какой механизм формирования пленки на поверхности подложки (островковый, послойный или комбинированный) будет реализован?
16. В каком случае пленка будет расти по островковому механизму (Фольмера-Вебера)?
17. В каком случае пленка будет расти по послойному механизму (Франка -

Ван дер Мерве)?

18. Чем отличается механизм роста Франка - Ван дер Мерве от механизма Крастанова – Странского?

19. Какой вид структурных дефектов будет основным в случае реализации механизма Франка - Ван дер Мерве, какой - в случае Фольмера-Вебера?

20. Нарисовать график зависимости упругой деформации от толщины пленки, растущей по механизму Франка - Ван дер Мерве.

### **7.2.3 Примерный перечень заданий для решения прикладных задач**

1 Ионная бомбардировка для получения чистых поверхностей для вакуумного процесса наращивания тонких пленок осуществляется положительными ионами аргона с энергией

а) несколько сотен эВ

б) мэВ

в) эВ

2 Расположите в правильном порядке стадии технологии производства подготовки поверхности полупроводниковых кристаллов

а) полировка

б) травление

в) шлифовка

г) промывка

3 Поверхность, у которой атомы сдвинуты на небольшие расстояния по сравнению с соответствующими плоскостями, параллельными поверхности в объеме кристалла называют

а) перестроенной

б) смещенной

в) вицинальной

4 Методы дифракции электронов можно отнести к

а) косвенным методам наблюдения

б) прямым методам наблюдения

в) непосредственным методам наблюдения

5 Изменение энергии электронного пучка в методе ДМЭ позволяет

а) фокусировать электронный пучок

б) увеличивать интенсивность рефлексов

в) последовательно зондировать приповерхностные плоскости

6 В методе дифракции быстрых электронов используют электроны с энергией

а) 10 МэВ

б) 10 эВ

в) 20 кэВ

7 Процесс ионизации атомов газа в сильном электростатическом поле у поверхности эмиттера-образца без предварительной их адсорбции, положен в основу

а) отражательной электронной микроскопии

б) автоионной микроскопии

в) дифракции медленных электронов

8 Какой из методов непригоден для исследования морфологии поверхности

а) автоионная микроскопия

б) реплики с извлечениями

в) метод декорирования

9 При анализе химического состава тонких пленок не используется следующий вид возбуждения

а) электрическое поле

б) электроны

в) химические реакции

г) термический нагрев

10 Какой метод основан на том, что при взаимодействии электронов зондирующего электронного пучка с атомами вещества происходит их внутренняя ионизация и возникают серии электронных переходов, сопровождающихся рентгеновским излучением, характеризующим элементный состав

а) вторичная ионная масс-спектрометрия

б) электронно-зондовый микроанализ

в) рентгеновский флюоресцентный анализ

1. Как влияет температура подложки на размер зерен в формирующейся пленке:

- увеличение температуры подложки приводит к \_\_\_\_\_ размера зерна, почему так?

- уменьшение температуры подложки приводит к \_\_\_\_\_ размера зерна, почему так?

2. Как влияет термический отжиг поликристаллической пленки на размер зёрен? Почему так? Какие процессы могут при этом происходить?

3. Какие материалы могут использоваться в качестве подложек?

4. Методы очистки подложки (просто названия)?

5. Суть метода очистки подложки ионной бомбардировкой, плюсы, минусы.

6. Суть метода очистки подложки прогревом в вакууме, плюсы, минусы.

7. Какие методы очистки подложек дают наилучшие результаты и почему?

8. Классификация микронапряжений в пленках, формируемых на подложках.

9. Чем определяется электрическое сопротивление металлов? С чем связан положительный знак температурного коэффициента электросопротивления у металлов?

10. Чем обусловлено остаточное сопротивление металлов при низких (гелиевых) температурах (если, конечно, металл не является сверхпроводником)?
11. В чем суть классического размерного эффекта?
12. Как влияет толщина металлической пленки на величину её удельного сопротивления ?
13. При каких условиях в сплошной металлической пленке начинает проявляться размерный эффект?
14. Основные экспериментально наблюдаемые особенности электрических свойств островковых пленок?
15. Какой знак имеет температурный коэффициент сопротивления у островковых пленок? Объяснить почему.
16. Как будет меняться сопротивление островковой пленки при охлаждении если измерение будет проводиться на: - постоянном токе; - переменном токе высокой частоты?
17. Как толщина ферромагнитной пленки влияет на величину температуры Кюри?
18. Чем определяется ширина доменной стенки в ферромагнитном материале?
19. В чем заключается отличие доменной стенки Блоха от доменной стенки Нееля?
20. Какие доменные стенки более вероятны в случае тонкой пленки (Блоха или Нееля), почему?
21. Как проявляется магнитная анизотропия формы в тонких пленках?

#### **7.2.4 Примерный перечень вопросов для подготовки к зачету**

Не предусмотрено учебным планом

#### **7.2.5 Примерный перечень заданий для экзамена**

1. Испарение и конденсация в вакууме.
2. Ионное распыление.
3. Химические методы получения пленок.
4. Способы подготовки поверхностей подложек для наращивания пленок.
5. Методы исследований атомной структуры поверхности.

6. Исследование морфологии поверхности подложек и пленок.
7. Методы исследования химического состава тонких пленок и поверхности подложек (электронно-зондовый микроанализ, электронная Оже-спектроскопия).
8. Методы исследования химического состава тонких пленок и поверхности подложек (рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, вторично-ионная масс-спектрометрия).
9. Сравнительная характеристика механизмов роста пленок.
10. Рост по Фольмеру-Веберу (термодинамическая теория).
11. Рост по Фольмеру-Веберу (атомистическая теория).
12. Рост по Франку и Ван дер Мерве.
13. Рост по Крастанову – Странскому.
14. Механические свойства пленок (адгезия, упругость, пластичность, прочность, микротвердость).
15. Механические свойства пленок (макронапряжения: классификация и механизм образования).
16. Механические свойства пленок (макронапряжения: способы измерения и общие закономерности поведения).
17. Механические свойства пленок (внутреннее трение).
18. Механизмы электропроводности островковых пленок.
19. Электропроводность сплошных пленок. Эффект Холла. Тензоэффект.
20. Сверхпроводимость пленок.
21. Свойства диэлектрических пленок.
22. Ферромагнитные пленки.
23. Примеры практического применения тонких пленок в электронике, вычислительной технике и приборостроении.

#### **7.2.6. Методика выставления оценки при проведении промежуточной аттестации**

*Экзамен проводится по тест-билетам, каждый из которых содержит 10 вопросов и задачу. Каждый правильный ответ на вопрос в тесте*

оценивается 1 баллом, задача оценивается в 10 баллов (5 баллов верное решение и 5 баллов за верный ответ). Максимальное количество набранных баллов – 20.

1. Оценка «Неудовлетворительно» ставится в случае, если студент набрал менее 6 баллов.

2. Оценка «Удовлетворительно» ставится в случае, если студент набрал от 6 до 10 баллов

3. Оценка «Хорошо» ставится в случае, если студент набрал от 11 до 15 баллов.

4. Оценка «Отлично» ставится, если студент набрал от 16 до 20 баллов.

### 7.2.7 Паспорт оценочных материалов

№ п/п	Контролируемые разделы (темы) дисциплины	Код контролируемой компетенции	Наименование оценочного средства
1	Методы получения тонких пленок металлов, полупроводников, диэлектриков	ПК-5	Тест, контрольная работа, защита лабораторных работ, защита реферата, ....
2	Методы контроля структуры и химического состава поверхности подложек и пленок	ПК-5	Тест, контрольная работа, защита лабораторных работ, защита реферата, ....
3	Механизмы роста пленок	ПК-5	Тест, контрольная работа, защита лабораторных работ, защита реферата, ....
4	Особенности физических свойств тонких пленок	ПК-5	Тест, контрольная работа, защита лабораторных работ, защита реферата, ....
5	Некоторые примеры практического применения тонких пленок в электронике, вычислительной технике и приборостроении	ПК-5	Тест, контрольная работа, защита лабораторных работ, защита реферата, ....

### 7.3. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

Тестирование осуществляется, либо при помощи компьютерной системы тестирования, либо с использованием выданных тест-заданий на бумажном носителе. Время тестирования 30 мин. Затем осуществляется проверка теста экзаменатором и выставляется оценка согласно методики выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

Решение стандартных задач осуществляется, либо при помощи компьютерной системы тестирования, либо с использованием выданных задач на бумажном носителе. Время решения задач 30 мин. Затем осуществляется проверка решения задач экзаменатором и выставляется оценка, согласно

методики выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

Решение прикладных задач осуществляется, либо при помощи компьютерной системы тестирования, либо с использованием выданных задач на бумажном носителе. Время решения задач 30 мин. Затем осуществляется проверка решения задач экзаменатором и выставляется оценка, согласно методики выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

## **8 УЧЕБНО МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ)**

### **8.1 Перечень учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины**

1. Иевлев В.М., Бугаков А.В., Трофимов В.И. Рост и субструктура конденсированных пленок Учебное пособие.-Воронеж: ВГТУ.-2000.-123 с. печатн

2. Л.И. Янченко, М.А. Каширин МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ к лабораторным работам № 1—4 по дисциплине «Тонкопленочные материалы и устройства» для студентов направления 223200.68 «Техническая физика. Прикладная физика твердого тела» Воронеж, ВГТУ, 2013. 35 с. Эл

3. Л.И. Янченко Методические указания к практическим работам по дисциплине «Тонкопленочные материалы и устройства» для студентов направления 223200.68 «Техническая физика» (магистерская программа подготовки «Прикладная физика твердого тела») очной формы обучения ВГТУ, Воронеж, 2013, 270-2013, 0,9 п.л., 15 с.

### **8.2 Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине, включая перечень лицензионного программного обеспечения, ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», современных профессиональных баз данных и информационных справочных систем:**

Автоматизированный измерительный комплекс сбора и предварительной обработки экспериментальных данных

Программа обработки и анализа микроскопических исследований ImageJ

Графическая обработка экспериментальных данных Origin 8.0

## **9 МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ БАЗА, НЕОБХОДИМАЯ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА**

1. Лекционная аудитория, оснащенная оборудованием для лекционных демонстраций и проекционной аппаратурой.
2. Учебно-научная лаборатория “Нанотехнологии и наноматериалы”.
3. Учебно-научная лаборатория “Технология материалов электронной техники”.

#### 4. Учебно-научная лаборатория “Физических методов исследования”.

Дисплейный класс, оснащенный компьютерными программами для проведения лабораторного практикума

### 10. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

По дисциплине «Физика и технология тонких пленок» .

Основой изучения дисциплины являются лекции, на которых излагаются наиболее существенные и трудные вопросы, а также вопросы, не нашедшие отражения в учебной литературе.

Практические занятия направлены на приобретение практических навыков расчета размерного эффекта физических свойств тонких пленок. Занятия проводятся путем решения конкретных задач в аудитории.

Лабораторные работы выполняются на лабораторном оборудовании в соответствии с методиками, приведенными в указаниях к выполнению работ.

Методика выполнения курсовой работы изложена в учебно-методическом пособии. Выполнять этапы курсовой работы должны своевременно и в установленные сроки.

Контроль усвоения материала дисциплины производится проверкой курсовой работы, защитой курсовой работы.

Вид учебных занятий	Деятельность студента
Лекция	Написание конспекта лекций: кратко, схематично, последовательно фиксировать основные положения, выводы, формулировки, обобщения; помечать важные мысли, выделять ключевые слова, термины. Проверка терминов, понятий с помощью энциклопедий, словарей, справочников с выписыванием толкований в тетрадь. Обозначение вопросов, терминов, материала, которые вызывают трудности, поиск ответов в рекомендуемой литературе. Если самостоятельно не удастся разобраться в материале, необходимо сформулировать вопрос и задать преподавателю на лекции или на практическом занятии.
Практическое занятие	Конспектирование рекомендуемых источников. Работа с конспектом лекций, подготовка ответов к контрольным вопросам, просмотр рекомендуемой литературы. Прослушивание аудио- и видеозаписей по заданной теме, выполнение расчетно-графических заданий, решение задач по алгоритму.
Лабораторная работа	Лабораторные работы позволяют научиться применять теоретические знания, полученные на лекции при решении конкретных задач. Чтобы наиболее рационально и полно использовать все возможности лабораторных для подготовки к ним необходимо: следует разобрать лекцию по соответствующей теме, ознакомиться с соответствующим разделом учебника, проработать дополнительную литературу и источники, решить задачи и выполнить другие письменные задания.
Самостоятельная работа	Самостоятельная работа студентов способствует глубокому усвоения учебного материала и развитию навыков самообразования.

	<p>Самостоятельная работа предполагает следующие составляющие:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- работа с текстами: учебниками, справочниками, дополнительной литературой, а также проработка конспектов лекций;</li> <li>- выполнение домашних заданий и расчетов;</li> <li>- работа над темами для самостоятельного изучения;</li> <li>- участие в работе студенческих научных конференций, олимпиад;</li> <li>- подготовка к промежуточной аттестации.</li> </ul>
<p>Подготовка к промежуточной аттестации</p>	<p>Готовиться к промежуточной аттестации следует систематически, в течение всего семестра. Интенсивная подготовка должна начаться не позднее, чем за месяц-полтора до промежуточной аттестации. Данные перед экзаменом три дня эффективнее всего использовать для повторения и систематизации материала.</p>