

**Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»**

УТВЕРЖДЕНО

**Директор физтех-школы
электроники, фотоники и
молекулярной физики**

В.В. Иванов

	Рабочая программа дисциплины (модуля)
по дисциплине:	Метрологическое обеспечение наноэлектроники
по направлению:	Электроника и наноэлектроника
профиль подготовки:	Микро- и наноэлектроника Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра микро- и наноэлектроники
курс:	4
квалификация:	бакалавр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

7 (осенний) - Дифференцированный зачет

8 (весенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 60 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 30 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: А.Р. Бегишев

Программа обсуждена на заседании кафедры микро- и наноэлектроники 29.05.2020

Аннотация

Курс "" предусматривает получение базовых теоретических знаний в области метрологии современного производства изделий микро и нано электроники, более глубокое изучение физических методов, методик измерения и оборудования, применяемых в современном производстве, а также методов обработки данных.

Задачи курса:

- изучение физических принципов, лежащих в основе построения современных измерительных систем для производства изделий наноэлектроники;
- изучение методологии построения схем контроля для различного типа технологических процессов;
- получение навыков работы на контрольно-измерительном и физико-аналитическом оборудовании в условиях реального производства.

Основное содержание курса изложено в следующих разделах:

1. Особенности метрологии в современном производстве интегральных схем.
2. Система контроля параметров современных технологических процессов
3. Физические основы методов метрологии линейных размеров
4. Оптические методы метрологии диэлектрических слоев и структур
5. Физические основы метрологии металлических слоев и структур
6. Электрофизические методы контроля
7. Методы контроля дефектности
8. Аналитические методы исследования объектов микро и нано электроники.
9. Современные системы обработки и анализа данных в производстве ИС.
10. Рентгеновские методы контроля состава слоев и поверхностных загрязнений

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

- получение базовых теоретических знаний в области метрологии современного производства изделий микро и нано электроники, более глубокое изучение физических методов, методик измерения и оборудования, применяемых в современном производстве, а также методов обработки данных.

Задачи дисциплины

- изучение физических принципов, лежащих в основе построения современных измерительных систем для производства изделий наноэлектроники;
- изучение методологии построения схем контроля для различного типа технологических процессов;
- получение навыков работы на контрольно-измерительном и физико-аналитическом оборудовании в условиях реального производства.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ПК-4 Способен критически оценивать применимость используемых методик и методов	ПК-4.2 Знает источники происхождения и умеет производить оценку погрешности измерений и достоверности экспериментальных результатов
	ПК-4.1 Знает численные порядки величин, характерных для соответствующей профессиональной области

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны знать:

- физические основы методов измерения, основные принципы построения измерительного оборудования, методики измерения, физические особенности объектов измерения, физические ограничения методов измерения. Основы метрологии.

уметь:

- выбирать адекватную физическую модель объекта измерения, разрабатывать оптимальный план контроля. Проводить проверку готовности средств измерения. Проводить измерения стандартных образцов мониторинговых пластин.

владеть:

- статистическими методами обработки измерительных данных, алгоритмами принятия решения на основе статистических методов управления процессами (контрольные карты, оценка состояния процесса), начальными навыками разработки измерительных программ для контрольно-измерительного оборудования.

4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Особенности метрологии в современном производстве интегральных схем	6			2
2	Система контроля параметров современных технологических процессов	8			4
3	Физические основы методов метрологии линейных размеров	8			4
4	Оптические методы метрологии диэлектрических слоев и структур	4			3
5	Физические основы метрологии металлических слоев и структур	4			2
6	Электрофизические методы контроля	8			3
7	Методы контроля дефектности	4			4
8	Аналитические методы исследования объектов микро и нано электроники	8			4
9	Современные системы обработки и анализа данных в производстве ИС	6			2
10	Рентгеновские методы контроля состава слоев и поверхностных загрязнений	4			2
Итого часов		60			30
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		90 час., 2 зач.ед.			

4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 7 (Осенний)

1. Особенности метрологии в современном производстве интегральных схем

Современное микроэлектронное производство, основные направления развития и перспективы, Широта применяемых физических методов, новые материалы, требования к измерительным системам по точности, стандарты и контрольные образцы, поверочные схемы, матчинг контрольно-измерительного оборудования, постоянное совершенствование.

2. Система контроля параметров современных технологических процессов

Производство как система связанных процессов, процессный подход, классификация технологических процессов- групповые и индивидуально поточные, система описания технологических процессов, параметры и их характеристики, объекты контроля, структура данных, методы статистического управления процессами, вариабельность процессов, контролируемые и неконтролируемые процессы. Контрольный план, контроль продукции, выборки, контроль по альтернативному признаку качества.

3. Физические основы методов метрологии линейных размеров

Электронно-микроскопические методы. Особенности формирования электронного изображения. Ограничения метода. Скатерометрия. Особенность объектов контроля, необходимость статистического рассмотрения. Оборудование. Особенности метрологии малых размеров.

4. Оптические методы метрологии диэлектрических слоев и структур

Рефлектометрия в широком спектральном диапазоне, эллипсометрия, спектральная эллипсометрия, многоугловая рефлектометрия, построение модели многослойных структур, решение обратной задачи, оборудование. Точностные характеристики методов и оборудования. Требования к стандартным образцам.

5. Физические основы метрологии металлических слоев и структур

Зондирование структур лазерными импульсами, возбуждение акустических волн, возбуждение термических волн, многослойные структуры, измерение толщины, измерение доз легирования, оборудование. Влияние переходных слоев и границы раздела.

Семестр: 8 (Весенний)

6. Электрофизические методы контроля

4х-зондовый, контроль геометрии и напряжений в пленках, фотоэлектрика, оборудование.

7. Методы контроля дефектности

Рассеяние света, контроль пластин без топологии, автоматический контроль «темное поле» «светлое поле», контроль топологии, оборудование.

8. Аналитические методы исследования объектов микро и nano электроники

СЭМ, ПЭМ, ОЖЕ, ВИМС, ИК-Фурье, Раммановское рассеяние, РФ- микроанализ, оборудование.

9. Современные системы обработки и анализа данных в производстве ИС

Сбор и статистическая обработка данных, корреляционные и аналитические системы ACE-XP, Klarity Defect.

10. Рентгеновские методы контроля состава слоев и поверхностных загрязнений

Основы рентгенофлуоресцентного анализа состава слоев и структур, физические модели, калибровка метода, стандартные образцы. Контроль поверхностных загрязнений методом рентгенофлуоресцентного анализа при полном поверхностном отражении, пределы обнаружения, методы увеличения чувствительности с помощью химических методов. Контроль толщины с помощью, оборудование.

5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

Необходимое оборудование для лекций: аудитория, компьютер и мультимедийное оборудование (проектор), доступ в ЧПП и к контрольно-измерительному оборудованию производственной линейки 200мм.

Обеспечение самостоятельной работы: доступ в сеть Интернет, доступ к рекомендованной литературе.

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Г.А. Новиков. «Основы метрологии»: учебное пособие / Г.А. Новиков.— Ульяновск: УлГТУ, 2010. – 182 с. ISBN 978-5-9795-0619-7
2. С.В. Смирнов. «Методы и оборудование контроля параметров технологических процессов производства наногетероструктур и наногетероструктурных монокристаллических интегральных схем» : учеб. пособие / С.В. Смирнов. – Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. – Томск, 2010. – 115 с.
3. Д.Брандон, У.Каплан. «Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля», Перевод с английского под редакцией С.Л.Баженова, Техносфера, - Москва, 2004. – 384с.
4. ЦКП "Материаловедение и диагностика в передовых технологиях" при ФТИ им. А.Ф. Иоффе, «Взаимодействие электронного пучка с образцом», Санкт-Петербург, 2010.

Дополнительная литература

1. ITRS, "International Technology Road Map for Semiconductors Metrology Roadmap 2011. Metrology Technical Working Group, winter meeting, Dec.2011 S. Korea
2. В.Гавриленко, Ю.Новиков, Ю.Озерин, А.Раков, П.Тодуа, «Российский прототип международного тест-объекта нанорельефа для РЭМ и АСМ. Наноиндустрия №6/2008

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

1. Jerry Hunter, «IMPROVING DEPTH PROFILE MEASUREMENTS OF NATURAL MATERIALS: LESSONS LEARNED FROM ELECTRONIC MATERIALS DEPTH PROFILING or Depth Profiling Tricks of the Trade», Virginia Tech, www.vt.edu.
2. ITRS, «Metro2011» <http://www.itrs.net/home.html>.
3. StatSoft, Inc. (2001). Электронный учебник по промышленной статистике. Москва, StatSoft. http://www.statsoft.ru/home/portal/textbook_ind/default.htm.
4. StatSoft, Inc. (2001). Электронный учебник по статистике. Москва, StatSoft. <http://www.statsoft.ru/home/textbook/default.htm>

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

мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций.

9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)

- 1) посещение всех лекций, предусмотренных учебным планом; ведение конспектов занятий; активное участие в обсуждении лекций;

2) важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультацией к преподавателю на лекции.

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

по направлению:	Электроника и нанoeлектроника
профиль подготовки:	Микро- и нанoeлектроника Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра микро- и нанoeлектроники
курс:	4
квалификация:	бакалавр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

- 7 (осенний) - Дифференцированный зачет
- 8 (весенний) - Дифференцированный зачет

Разработчик: А.Р. Бeгишев

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ПК-4 Способен критически оценивать применимость используемых методик и методов	ПК-4.2 Знает источники происхождения и умеет производить оценку погрешности измерений и достоверности экспериментальных результатов
	ПК-4.1 Знает численные порядки величин, характерных для соответствующей профессиональной области

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Метрологическое обеспечение нанoeлектроники» обучающийся должен:

знать:

- физические основы методов измерения, основные принципы построения измерительного оборудования, методики измерения, физические особенности объектов измерения, физические ограничения методов измерения. Основы метрологии.

уметь:

- выбирать адекватную физическую модель объекта измерения, разрабатывать оптимальный план контроля. Проводить проверку готовности средств измерения. Проводить измерения стандартных образцов мониторинговых пластин.

владеть:

- статистическими методами обработки измерительных данных, алгоритмами принятия решения на основе статистических методов управления процессами (контрольные карты, оценка состояния процесса), начальными навыками разработки измерительных программ для контрольно-измерительного оборудования.

3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

С целью контроля освоения обучающимися учебного материала проводится устный опрос в начале занятия по теме прошлой лекции или в конце занятия по пройденной теме.

4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

Вопросы для подготовки к дифференцированному зачету:

1. Особенности метрологии в современном производстве интегральных схем.
2. Система контроля параметров современных технологических процессов
3. Физические основы методов метрологии линейных размеров
4. Оптические методы метрологии диэлектрических слоев и структур
5. Физические основы метрологии металлических слоев и структур
6. Электрофизические методы контроля
7. Методы контроля дефектности
8. Аналитические методы исследования объектов микро и нано электроники.
9. Современные системы обработки и анализа данных в производстве ИС.
10. Рентгеновские методы контроля состава слоев и поверхностных загрязнений

Критерии оценивания

10 баллов — (ПРЕВОСХОДНО):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам учебной программы, а также по основным вопросам, выходящим за ее пределы;
- точное использование научной терминологии (в том числе на иностранном языке), стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы;

- безупречное владение инструментарием учебной дисциплины, умение его эффективно использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач;
- выраженная способность самостоятельно и творчески решать сложные проблемы в нестандартной ситуации;
- полное и глубокое усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку, использовать научные достижения других дисциплин;
- творческая самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, активное участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

9 баллов — (ОТЛИЧНО):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам учебной программы;
- точное использование научной терминологии (в том числе на иностранном языке), стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его эффективно использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач;
- способность самостоятельно и творчески решать сложные проблемы в нестандартной ситуации в рамках учебной программы, полное усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку;
- самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, творческое участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

8 баллов — (ПОЧТИ ОТЛИЧНО):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем поставленным вопросам в объеме учебной программы;
- использование научной терминологии, стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать обоснованные выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины (методами комплексного анализа, техникой информационных технологий), умение его использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач; способность самостоятельно решать сложные проблемы в рамках учебной программы;
- усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку с позиций государственной идеологии (по дисциплинам социально-гуманитарного цикла);
- активная самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, систематическое участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

7 баллов — (ОЧЕНЬ ХОРОШО):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам учебной программы;
- использование научной терминологии (в том числе на иностранном языке), лингвистически и логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать обоснованные выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач;
- усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку;
- самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

6 баллов — (ХОРОШО):

- достаточно полные и систематизированные знания в объеме учебной программы;
- использование необходимой научной терминологии, стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать обоснованные выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в решении учебных и профессиональных задач; способность самостоятельно применять типовые решения в рамках учебной программы;

- усвоение основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в базовых теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им сравнительную оценку; активная самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, периодическое участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

5 баллов — (ПОЧТИ ХОРОШО):

- достаточные знания в объеме учебной программы;
- использование научной терминологии, стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в решении учебных и профессиональных задач;
- способность самостоятельно применять типовые решения в рамках учебной программы;
- усвоение основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в базовых теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им сравнительную оценку;
- самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

4 балла — (УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО), ЗАЧТЕНО:

- достаточный объем знаний в рамках образовательного стандарта;
- усвоение основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- использование научной терминологии, стилистическое и логическое изложение ответа на вопросы, умение делать выводы без существенных ошибок;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в решении стандартных (типовых) задач;
- умение под руководством преподавателя решать стандартные (типовые) задачи;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им оценку;
- работа под руководством преподавателя на практических, лабораторных занятиях, допустимый уровень культуры исполнения заданий.

3 балла — (НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО), НЕЗАЧТЕНО:

- недостаточно полный объем знаний в рамках образовательного стандарта;
- знание части основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- использование научной терминологии, изложение ответа на вопросы с существенными лингвистическими и логическими ошибками;
- слабое владение инструментарием учебной дисциплины, некомпетентность в решении стандартных (типовых) задач;
- неумение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях изучаемой дисциплины;
- пассивность на практических и лабораторных занятиях, низкий уровень культуры исполнения заданий.

2 балла — (НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО):

- фрагментарные знания в рамках образовательного стандарта;
- знания отдельных литературных источников, рекомендованных учебной программой дисциплины;
- неумение использовать научную терминологию дисциплины, наличие в ответе грубых стилистических и логических ошибок;
- пассивность на практических и лабораторных занятиях, низкий уровень культуры исполнения заданий.

1 балл — (НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО):

- отсутствие знаний и компетенций в рамках образовательного стандарта или отказ от ответа.

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

При проведении дифференцированного зачета обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося по билету не должен превышать двух астрономических часов в устной и (или) письменной форме.