

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова

Кафедра микроэлектроники и общей физики

УТВЕРЖДАЮ  
Декан физического факультета



И. С. Огнев  
(подпись)

«23» мая 2023 г.

**Рабочая программа дисциплины**  
**«Плазменные технологии в электронике и нанoeлектронике»**

Направление подготовки  
11.04.04 Электроника и нанoeлектроника

Магистерская программа  
«Интегральная электроника и нанoeлектроника»

Квалификация выпускника  
Магистр

Форма обучения  
очная

Программа рассмотрена  
на заседании кафедры МЭОФ  
от «17» апреля 2023 года, протокол № 5

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

### 1. Цели освоения дисциплины

Целями освоения дисциплины «Плазменные технологии в электронике и наноэлектронике» являются:

- изучение физических процессов в плазме,
- формирование знаний о получении и использовании плазмы в технологических процессах,
- изучение приемов применения плазменных процессов в технологии микро- и наноэлектроники.

### 2. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина «Плазменные технологии в электронике и наноэлектронике» относится к части, формируемой участниками образовательных отношений, и имеет индекс Б1.В.10.

Данная дисциплина требует для своего изучения знания общего курса физики (раздел «Электричество и магнетизм»), дисциплин «Физика полупроводников и низкоразмерных систем», «Материалы электронной техники», «Основы конструирования и технологии электронных средств», «Компоненты электронной техники».

Дисциплина «Плазменные технологии в электронике и наноэлектронике» является основой для изучения последующих курсов, таких как «Актуальные проблемы современной электроники и наноэлектроники», курсов по выбору части, формируемой участниками образовательных отношений.

### 3. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы

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

Формируемая компетенция (код и формулировка)	Индикатор достижения компетенции (код и формулировка)	Перечень планируемых результатов обучения
<b>Профессиональные компетенции</b>		
ПК-1 Готов формулировать цели и задачи научных исследований в соответствии с тенденциями и перспективами развития электроники	ИД_ПК-1.1. Знает принципы построения и функционирования изделий микро- и наноэлектроники.	<b>Знает:</b> - основные принципы построения и функционирования изделий микро- и наноэлектроники; - подходы к формированию элементов с заданными свойствами. <b>Умеет:</b> - проводить систематизацию технологических процессов микро- и наноэлектроники.  <b>Владеет навыками:</b> - построения технологических линеек систем электроники.

и наноэлектроники, а также смежных областей науки и техники, способностью обоснованно выбирать теоретические и экспериментальные методы и средства решения сформулированных задач.	ИД_ПК-1.2. Осуществляет расчет предельно-допустимых и предельных режимов работы изделий микро- и наноэлектроники.	<p><b>Знает:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- основные требования к изделиям электронной техники с точки зрения диапазонов оптимального функционирования.</li> </ul> <p><b>Умеет:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- анализировать технические характеристики электронных систем.</li> </ul> <p><b>Владеет навыками:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- выбора оптимальных условий создания и работы электронных устройств.</li> </ul>
	ИД_ПК-1.3. Демонстрирует умение выбора теоретических и экспериментальных методов исследования изделий микро- и наноэлектроники.	<p><b>Знает:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- основные технологии создания интегральных схем и наноразмерных систем</li> </ul> <p><b>Умеет:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- критически анализировать результаты тестирования схем на всех этапах их создания.</li> </ul> <p><b>Владеет навыками:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- выбора оптимальных технологических приемов формирования элементов схем микро- и наноэлектроники.</li> </ul>

#### 4. Объем, структура и содержание дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 2 зачетные единицы, 72 акад. часов.

№ п/п	Темы (разделы) дисциплины, их содержание	Семестр	Виды учебных занятий, включая самостоятельную работу студентов, и их трудоемкость (в академических часах)						Формы текущего контроля успеваемости  Форма промежуточной аттестации (по семестрам)  Формы ЭО и ДОТ*
			Контактная работа						
			Лекции	практические	лабораторные	консультации	аттестационн	самостоятель ная работа	
1	Вводный курс	2	2					1	Дискуссия
2	Физика неравновесной, низкотемпературной плазмы	2	4					4	Дискуссия
3	Конструкции, характеристики плазмы в реакторах.	2	4					4	Дискуссия

	используемых в технологии микро – и наноэлектроники								
4	Плазмохимия	2	4					4	
5	Методы диагностики химически активной плазмы	2	4					4	Дискуссия,
6	Ионно-плазменные процессы взаимодействия с поверхностью	2	4					4	Дискуссия
7	Плазмохимические процессы травления в технологии электроники и наноэлектроники	2	6			1		5	Дискуссия
8	Плазмохимические процессы осаждения в технологии электроники и наноэлектроники.	2	6			1		5	Дискуссия
9	Тенденции развития ионно-плазменных процессов в технологии наноэлектроники.	2	2					0,7	
	Всего за 2 семестр		36			2		31,7	
							0,3		Зачет
	<b>Всего</b>		<b>36</b>			<b>4</b>	<b>0,3</b>	<b>31,7</b>	

*Примечание. Формы ЭО и ДОТ не предусмотрены. В случае перехода на дистанционное обучение будут использованы возможности LMS Moodle и других ресурсов.*

## Содержание разделов дисциплины:

### 1. Вводная лекция.

Свойства неравновесной плазмы, позволяющие стать основой плазменных технологий в микро – и нанoeлектронике. Место плазменных технологий в изготовлении интегральных схем (ИС). Маршрут изготовления ИС. Обзор применения плазмохимических процессов травления и осаждения в технологии микро- и нанoeлектроники.

**2 часа**

### 2. Физика низкотемпературной плазмы (НТП).

Плазма различных типов разрядов, Теоретические и экспериментальные методы исследования НТП. Функция распределения заряженных частиц по энергиям. Движение ионов в приэлектродном слое.

**4 часа**

### 3. Конструкции, характеристики плазмы в реакторах, используемых в технологии микро – и нанoeлектроники.

Реакторы с СВЧ, ВЧ индукционным и емкостными источниками плазмы, используемые в технологии нанoeлектроники. Влияние магнитного поля на характеристики плазмы. Принцип управления энергией ионов. Магнетроны и их использование технологии нанесения пленок.

**4 часа**

### 4. Плазмохимия.

Плазма химически активных газов и ее использование в нанотехнологии. Физико-химические процессы в реакторе химически активных газов. Теоретическое рассмотрение плазмы галогенсодержащих газов. Уравнение баланса частиц и методы управления химическим составом плазмы.

**4 часа**

### 5. Методы диагностики низкотемпературной и химически активной плазмы.

Зондовые и спектральные методы исследования характеристик плазмы различных типов разрядов. Одиночный зонд Ленгмюра, теория. Определение функции распределения электронов по энергии, плотности плазмы ионов. Определение функции распределения ионов по энергии. Актинометрический метод определения концентрации радикалов.

**4 часа**

### 6. Ионно-плазменные процессы взаимодействия с поверхностью.

Краткое рассмотрение явлений, происходящих при взаимодействии ионов с поверхностью. Ионно-плазменные распыления в технологии электроники и нанoeлектроники. Основные характеристики процесса низкоэнергетического ионного распыления. Экспериментальные и теоретические методы исследования распыления. Метод молекулярной динамики. Зависимость коэффициента распыления материалов от энергии, угла падения бомбардирующих ионов. Формирование наноструктур, рельефа поверхности под действием ионного облучения. Распыление многокомпонентных материалов. Взаимодействие кластерных ионов с поверхностью.

**4 часа**

### 7. Плазмохимические процессы травления в технологии электроники и нанoeлектроники.

Типы плазмохимических процессов травления. Плазменное, реактивно-плазменное травление, травление в послесвечении плазмы. Принципы и основные характеристики процессов травления материалов. Изотропное и анизотропное травление. Синергетические процессы травления кремния во фторсодержащей плазме. Плазменные процессы травления кремния, диоксида кремния, пленок металлов, материалов маски на разных стадиях технологии изготовления интегральных схем. Методы контроля процессов травления. Методы формирования высокоаспектных структур на поверхности в процессах травления. Моделирование процессов травления.

**6 часов**

## **8. Плазмохимические процессы осаждения в технологии электроники и наноэлектроники.**

Типы плазмохимических процессов осаждения, используемые в технологии изготовления интегральных схем. Принципы и основные характеристики процессов осаждения материалов. Плазменные процессы осаждения полупроводников, диэлектриков, других материалов наноэлектроники на разных стадиях технологии изготовления интегральных схем. Методы контроля процессов осаждения. Особенности осаждения в глубокие канавки. Моделирование процессов плазмохимического осаждения. **6 часов**

## **9. Тенденции развития ионно-плазменных процессов для целей**

**наноэлектроники.** Атомно-слоевые циклические процессы травления и осаждения в технологии наноэлектроники. **2 часа**

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

В процессе обучения используются следующие образовательные технологии:

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

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

**Консультации** – вид учебных занятий, являющийся одной из форм контроля самостоятельной работы студентов. На консультациях по просьбе студентов рассматриваются наиболее сложные моменты при освоении материала дисциплины, преподаватель отвечает на вопросы студентов, которые возникают у них в процессе самостоятельной работы.

В процессе обучения (при необходимости) используются следующие технологии электронного обучения и дистанционные образовательные технологии:

**Электронный учебный курс «Плазменные технологии в электронике и наноэлектронике» в LMS Электронный университет Moodle ЯрГУ**, в котором:

- представлены задания для самостоятельной работы обучающихся по темам дисциплины;
- осуществляется проведение отдельных мероприятий текущего контроля успеваемости студентов;
- представлены материалы по отдельным темам дисциплины;
- представлены правила прохождения промежуточной аттестации по дисциплине;
- представлен список учебной литературы, рекомендуемой для освоения дисциплины;
- представлена информация о форме и времени проведения консультаций по дисциплине в режиме онлайн;

- посредством форума осуществляется синхронное и (или) асинхронное взаимодействие между обучающимися и преподавателем в рамках изучения дисциплины.

## **6. Перечень лицензионного и (или) свободно распространяемого программного обеспечения, используемого при осуществлении образовательного процесса по дисциплине**

В процессе осуществления образовательного процесса по дисциплине используются:

для формирования материалов для текущего контроля успеваемости и проведения промежуточной аттестации, для формирования методических материалов по дисциплине:

- программы Microsoft Office;
- Adobe Acrobat Reader.

## **7. Перечень современных профессиональных баз данных и информационных справочных систем, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (при необходимости)**

В процессе осуществления образовательного процесса по дисциплине используются:

Автоматизированная библиотечно-информационная система «БУКИ-NEXT»\_  
[http://www.lib.uniyar.ac.ru/opac/bk\\_cat\\_find.php](http://www.lib.uniyar.ac.ru/opac/bk_cat_find.php)

## **8. Перечень основной и дополнительной учебной литературы, ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» (при необходимости), рекомендуемых для освоения дисциплины**

### **а) основная литература**

1. Кузнецов, Г. Д. Ионно-плазменная обработка материалов : Курс лекций / Кузнецов Г. Д., Кушхов А. Р. - Москва : МИСиС, 2008. - 180 с. - ISBN 2227-8397-2008-02. - Текст : электронный // ЭБС "Консультант студента" : [сайт]. - URL : <https://www.studentlibrary.ru/book/2227-8397-2008-02.html>

2. Берлин, Е. В. Ионно-плазменные процессы в тонкопленочной технологии / Берлин Е. В., Сейдман Л. А. - Москва : Техносфера, 2010. - 528 с. - ISBN 978-5-94836-222-9. - Текст : электронный // ЭБС "Консультант студента" : [сайт]. - URL : <https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785948362229.html1>.

### **б) дополнительная литература**

1. Плазменные технологии в производстве СБИС. Под. ред Айспрука. Мир.
2. Ю.П.Райзер. Физика газового разряда.
3. Lieberman M., Lichtenberg A.J. Principles of Plasma Discharges and Materials Processing, Second Edition, John Wiley and Sons, 2005.

### **в) ресурсы сети «Интернет»**

1. Электронная библиотека учебных материалов ЯрГУ  
([http://www.lib.uniyar.ac.ru/opac/bk\\_cat\\_find.php](http://www.lib.uniyar.ac.ru/opac/bk_cat_find.php)).

## **9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине**

Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине включает в свой состав специальные помещения:

- учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа;
- учебные аудитории для проведения групповых и индивидуальных консультаций,
- учебные аудитории для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации;
- помещения для самостоятельной работы;

Автор:

д.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_ И.И. Амиров  
(подпись)



**Приложение №1 к рабочей программе дисциплины  
«Плазменные технологии в электронике и нанoeлектронике»**

**Фонд оценочных средств  
для проведения текущего контроля успеваемости  
и промежуточной аттестации студентов  
по дисциплине**

**1. Типовые контрольные задания и иные материалы,  
используемые в процессе текущего контроля успеваемости**

**Темы для дискуссии**

**Задание по теме №1 «Вводная лекция».**

1. Пояснить, почему плазменные процессы являются одними из ключевых в технологии микро – и нанoeлектроники?
2. Сколько и какие операции используются в технологии изготовления современных интегральных схем?

**Задание по теме № 2 «Физика низкотемпературной плазмы» (НТП).**

1. Какие типы разрядов преимущественно используются в технологии микро – и нанoeлектроники и почему?
2. Пояснить, почему функция распределения электронов по энергиям является основной характеристикой неравновесной, низкотемпературной плазмы (НТП)?
3. Какие есть теоретические модели описания НТП?

**Задание по теме № 3. Конструкции, характеристики плазмы в реакторах, используемых в технологии микро – и нанoeлектроники.**

1. Пояснить достоинства и недостатки различных типов плазменных реакторов, используемых в технологии нанoeлектроники.
2. Пояснить в чем проявляется эффект влияния магнитного поля на характеристики плазмы?
3. В чем заключается принцип управления энергией ионов?

**Задание по теме № 4 «Плазмохимия».**

1. Перечислить основные физико-химические процессы, происходящие в реакторе химически активных газов.
2. Написать уравнение баланса частиц в химически активной плазме.
3. В каких областях нанотехнологии используется низкотемпературная химически активная плазма.

**Задание по теме №5 «Методы диагностики низкотемпературной и химически активной плазмы».**

1. В чем достоинства и недостатки зондовых методов диагностики плазмы?
2. В чем достоинства и недостатки спектральных методов исследования характеристик плазмы.

**Задание №6 «Ионно-плазменные процессы взаимодействия с поверхностью».**

1. Какими процессами взаимодействия ионов плазмы инертных газов с поверхностью обусловлено образование наноструктур?
2. Какие процессы ионно-плазменного распыления используются в технологии электроники и нанoeлектроники.
3. Как сильно зависит коэффициент распыления от энергии, угла падения ионов, температуры образца?

**Задание №7 «Плазмохимические процессы травления в технологии электроники и нанoeлектроники».**

1. В чем заключается синергетический эффект травления кремния во фторсодержащей плазме.
2. Какие есть типы плазмохимических процессов травления и в чем их отличие.
3. Какие основные характеристики плазмохимических процессов травления в технологии изготовления интегральных схем. Примеры.
4. В чем заключается принцип реализации плазменных процессов травления высокоаспектных структур? В чем причина возникновения апертурного эффекта?

**Задание №8 «Плазмохимические процессы осаждения в технологии электроники и нанoeлектроники».**

1. На каких стадиях технологии изготовления интегральных схем используются плазменные процессы осаждения, каких пленок?
2. Какие есть методы контроля процессов осаждения.
3. В чем особенность осаждения в глубокие канавки.

**Задание №9 «Тенденции развития ионно-плазменных процессов для целей нанoeлектроники».**

1. В чем принцип атомно-слоевых процессов травления и осаждения.

### **Правила выставления оценки по результатам индивидуального собеседования и дискуссии**

Оценка по результатам индивидуального собеседования и дискуссии считается в баллах по каждому заданию по следующему принципу:

- задание выполнено в полном объеме без замечаний преподавателя – 3 балла;
- при выполнении задания применены правильные подходы, но имеются неточности в изложении материала – 2 балла;
- при выполнении задания применены правильные подходы, но имеются значительные физические и/или математические ошибки – 1 балл;
- при выполнении задания применены ошибочные подходы, отсутствует понимание обсуждаемого материала – 0 баллов.

Количество баллов 3 соответствует оценке «отлично», 2 баллов – оценке «хорошо», 1 балл – оценке «удовлетворительно», 0 баллов – оценке «неудовлетворительно» (умения и навыки на данном этапе освоения дисциплины не сформированы).

### **Список заданий к зачету**

На зачете проверяется сформированность компетенций ПК-1 в части, касающейся тем №1-9. Зачет выставляется по результатам собеседования. Для получения зачета необходимо прохождение индивидуального финального собеседования на оценку не менее 3 баллов.

### **Правила выставления оценки по результатам финального собеседования:**

Оценка по результатам индивидуального финального собеседования определяется в баллах по следующему принципу: обучающемуся выдается 5 вопросов из Списка вопросов к зачету. За каждый правильно раскрытый вопрос дается 1 балл, неправильное раскрытие материала - 0 баллов. Общее число баллов за каждый вопрос суммируется. Для получения зачета по результатам собеседования необходимо набрать не менее 3 баллов.

Студент освобождается от прохождения индивидуального финального собеседования и автоматически получает зачет при условии, что при прохождении текущей аттестации у него имелась оценка «отлично» не менее чем по 5 темам из 9.

### **Список вопросов к зачету:**

1. Какие типы разрядов преимущественно используются в технологии микро – и нанoeлектроники и почему?
2. Определение функция распределения электронов по энергиям в плазме. Ее измерение зондовым методом. является основной характеристикой неравновесной, низкотемпературной плазмы (НТП)?
3. Теоретические модели описания НТП?
4. Достоинства и недостатки различных типов плазменных реакторов, используемых в технологии нанoeлектроники.
5. Влияние магнитного поля на характеристики плазмы.
6. Независимое управление энергией и потоком ионов в плазмохимическом реакторе.
7. Основные физико-химические процессы, происходящие в реакторе химически активных газов.
8. Уравнение баланса частиц в химически активной плазме.
9. Области нанотехнологии, в которых используется низкотемпературная химически активная плазма.
10. Достоинства и недостатки зондовых методов диагностики плазмы.
11. Достоинства и недостатки спектральных методов исследования характеристик плазмы.
12. Актинометрический метод определения радикального состава плазмы.
13. Механизм образования наноструктур при ионно-плазменной обработке.
14. Примеры использования ионно-плазменных процессов распыления технологии электроники и нанoeлектроники.
15. Коэффициент распыления материалов. Его зависимость от энергии, угла падения ионов, температуры образца.
16. Синергетический эффект травления кремния во фторсодержащей плазме.
17. Изотропное и анизотропное травление. Ионно-стимулированное травление.
18. Типы плазмохимических процессов травления и в чем их отличие.
19. Какие основные характеристики плазмохимических процессов травления в технологии изготовления интегральных схем. Примеры.
20. Моделирование плазменных процессов травления. Общее представление.
21. Метод процессов травления методом молекулярной динамики.
22. Принцип реализации плазменных процессов травления высокоаспектных структур.
23. Апертурный эффект.
24. Плазменные процессы осаждения пленок диэлектриков в технологии изготовления интегральных схем.

## **Приложение №2 к рабочей программе дисциплины «Плазменные технологии в электронике и нанoeлектронике»**

### **Методические указания для студентов по освоению дисциплины**

Основной формой изложения учебного материала по дисциплине «**Плазменные технологии в электронике и нанoeлектронике**» являются лекции с использованием элементов научной дискуссии.

Контроль усвоения студентами изучаемого материала проходит в форме текущей аттестации и промежуточной аттестации в форме зачета. Для получения зачета необходимо прохождение индивидуального финального собеседования на оценку не менее 3 баллов. Освоить вопросы, излагаемые в процессе изучения дисциплины «**Плазменные технологии в электронике и нанoeлектронике**» самостоятельно студенту крайне сложно. Это связано со сложностью изучаемого предмета, большим объемом нового материала, включающим самые передовые достижения науки. Поэтому посещение аудиторных занятий является совершенно необходимым. Без регулярных занятий в течение семестра сдать зачет по итогам изучения дисциплины студенту практически невозможно.

### **Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов по дисциплине**

Для самостоятельной работы рекомендуется использовать учебную литературу из списка основной и дополнительной литературы. Для нахождения углубленной информации по специальным вопросам курса рекомендуется использовать следующие издания:

1. Плазменные технологии в производстве СБИС. Под. ред Айспрука. Мир.
2. Ю.П.Райзер. Физика газового разряда.
3. Lieberman M., Lichtenberg A.J. Principles of Plasma Discharges and Materials Processing, Second Edition, John Wiley and Sons, 2005