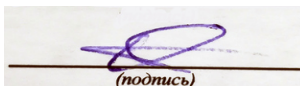


**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
**Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова**

Базовая кафедра нанотехнологий в электронике  
в ЯФ ФГБУН ФТИАН им. К. А. Валиева РАН

**УТВЕРЖДАЮ**

Декан физического факультета



(подпись)

И.С.Огнев

« 23 » мая 2023 г.

г.

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

Направление подготовки  
11.04.04 Электроника и нанoeлектроника

Направленность (профиль)  
«Интегральная электроника и нанoeлектроника»

Форма обучения  
Очная

Программа одобрена  
на заседании кафедры  
от « 30 » марта 2023 года, протокол № 8

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

### 1. Цели освоения дисциплины

Целями освоения дисциплины «Плазменные технологии в нанoeлектронике» являются: изучение основ физики и химии низкотемпературного газового разряда, ознакомление с современным состоянием плазменной технологии, средствами диагностики и моделирования процессов плазменной обработки различных материалов.

### 2. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина «Плазменные технологии в нанoeлектронике» относится к вариативной части блока Б1 образовательной программы магистратуры.

Изучается в 3 семестре после прохождения основных дисциплин базовой части блока. Дисциплина является существенно междисциплинарной и основывается на знаниях, полученных студентами при изучении дисциплин: методы математической физики, атомная и молекулярная физика, химия, электродинамика, физические основы электроники.

### 3. Требования к результатам освоения содержания дисциплины

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

| Формируемая компетенция<br>(код и формулировка)  | Индикатор достижения<br>компетенции<br>(код и формулировка)  | Перечень<br>планируемых результатов<br>обучения  |
|--|--|--|
| <b>Профессиональные компетенции</b>  |  |  |
| <b>ПК-2</b><br><br>Способен разрабатывать эффективные алгоритмы решения сформулированных задач с использованием современных языков программирования и обеспечивать их программную реализацию | <b>ИД_ПК-2.1.</b> Знает методы разработки эффективных алгоритмов решения научно-исследовательских задач. | <b>Знать:</b><br><br>- современные программные средства для решения научно-исследовательских и проектно-технологических задач в области плазменных технологий нанoeлектроники. |

|  |   |   |
|--|---|---|
|  | <p><b>ИД_ПК-2.2.</b> Применяет алгоритмы решения исследовательских задач с использованием современных языков программирования</p> | <p><b>Уметь:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- выбирать и применять современные вычислительные средства для решения научно-исследовательских и проектно-технологических задач плазменного осаждения и травления;</li> <li>- разрабатывать эффективные алгоритмы решения поставленных задач в выбранных программных средах.</li> </ul> <p><b>Владеть навыками:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- программирования с использованием современных программных средств.</li> </ul>   |
|  | <p><b>ИД_ПК-2.3.</b> Обладает навыками разработки стратегии и методологии исследования изделий микро- и нанoeлектроники.</p>      | <p><b>Знать:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- особенности применения плазменных технологий для производства твердотельных приборов и устройств микро и нанoeлектроники;</li> <li>- способы генерации плазмы и конструкции технологического плазменного оборудования;</li> </ul> <p><b>Владеть навыками</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- составления кратких технологических маршрутов изготовления наноразмерных элементов ИС с использованием плазменных процессов;</li> <li>- практической работы с технологическим оборудованием плазмохимического травления и осаждения.</li> </ul> |

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

Общая трудоемкость дисциплины составляет 1 зачетная единица, 72 акад. часа.

| №<br>п/п | Темы (разделы)<br><br>дисциплины,<br><br>их содержание                                      | Семестр | Виды учебных занятий,<br><br>включая самостоятельную<br>работу студентов,<br><br>и их трудоемкость<br><br>(в академических часах) |              |              |              |                             |                           | Формы текущего<br>контроля успеваемости<br><br>Форма промежуточной<br>аттестации<br><br>(по семестрам) |
|----------|---|---------|---|--------------|--------------|--------------|-----------------------------|---------------------------|--|
|          |   |         | Контактная работа   |              |              |              |                             | самостоятельная<br>работа |  |
|          |   |         | лекции  | практические | лабораторные | консультации | аттестационные<br>испытания |                           |  |
| 1        | Современное состояние<br>технологии<br>нанoeлектроники                                      | 3       | 1   |              |              |              |                             | 4                         | опрос  |
| 2        | Плазменные процессы в<br>нанoeлектронике.   | 3       | 1   |              |              |              |                             | 4                         | опрос  |
| 3        | Плазменное травление в<br>производстве изделий<br>нанoeлектроники.                          | 3       | 4   |              | 6            | 1            |                             | 8                         | Защита лабораторных<br>работ №1 и №2   |
| 4        | Технологии<br>плазменного осаждения<br>тонких пленок.                                       | 3       | 4   |              | 6            | 1            |                             | 8                         | Защита лабораторных<br>работ №3 и №4   |
| 5        | Технология ионно-<br>плазменного<br>легирования.  | 3       | 3   |              | 4            | 1            |                             | 6                         | Защита лабораторной<br>работы №5   |
| 6        | Современные<br>программные средства и<br>алгоритмы<br>моделирования<br>плазменных процессов | 3       | 3   |              |              | 1            |                             | 4                         | опрос  |
|          |   |         |   |              |              |              | 0,3                         | 1,7                       | зачет  |
|          | Всего за 3 семестр 72<br>часа   |         | 16  |              | 16           | 4            | 0,3                         | 35,7                      |  |
|          | ИТОГО   |         | 16  |              | 16           | 4            | 0,3                         | 35,7                      |  |

## **Содержание разделов дисциплины**

### **1. Современное состояние технологии нанoeлектроники**

Тенденции развития КМОП-технологии, закон Мура. Проблемы КМОП-технологии, возникающие при переходе к нанометровым размерам.

### **2. Плазменные процессы в нанoeлектронике**

Применение плазменных процессов в производстве твердотельных приборов и устройств нанoeлектроники. Тенденции развития плазменных технологий. Современные плазменные системы, используемые в производстве изделий нанoeлектроники. Кластерное оборудование. Характерные нарушения, вносимые плазменными процессами. Дegrадация параметров МОП-транзисторов при плазменных обработках.

### **3. Плазменное травление в производстве изделий нанoeлектроники**

Основные понятия плазменного травления. Технологические параметры плазменного травления. Современные требования к процессам и оборудованию для плазменного травления. Процессы плазменного травления функциональных слоев микро- и нанoeлектроники. Принципы выбора рабочих газов. Плазменное травление фоторезистивной маски. Плазменное травление кремния, диоксида кремния и нитрида кремния. Оптимизация параметров плазмохимического травления. Эффект микрозагрузки.

### **4. Технологии плазменного осаждения тонких пленок**

Активируемые плазмой методы получения тонких пленок. Характеристики структуры до и после операции осаждения функционального слоя. Технологические характеристики процессов осаждения функциональных слоев ИМС. Классификация процессов химического осаждения из газовой фазы (ХОГФ) функциональных слоев ИМС. Стимулированное плазмой осаждение пленок различного состава из газовой фазы. Плазмоактивируемые процессы атомнослоевого осаждения пленок различных материалов. Современные системы физического осаждения из газовой фазы (ФОГФ) и их особенности.

### **5. Технология ионно-плазменного легирования**

Ионно-плазменная имплантация бора. Ионно-плазменная имплантация мышьяка и фосфора. Сравнение методов ионно-плазменной и ионно-пучковой имплантации.

### **6. Современные программные средства и алгоритмы моделирования плазменных процессов**

Основы моделирования процессов травления в плазме. Расчет профилей при плазмохимическом травлении кремния. Программные средства для моделирования взаимодействия ускоренных ионов с поверхностью твердого тела. Расчет профилей ионного легирования для кремния. Моделирование напыления тонких пленок методами молекулярной динамики

### **5. Образовательные технологии, в том числе технологии электронного обучения и дистанционные 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 с элементами лекции-беседы** – последовательное изложение материала, осуществляемое преимущественно в виде монолога преподавателя. Элементы лекции-беседы обеспечивают контакт преподавателя с аудиторией, что позволяет привлекать внимание студентов к наиболее важным темам дисциплины, активно вовлекать их в учебный процесс, контролировать темп изложения учебного материала в зависимости от уровня его восприятия.

**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.

**Лабораторное занятие** – занятие, посвященное освоению конкретных умений и навыков и закреплению полученных на лекции знаний

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

В процессе осуществления образовательного процесса по дисциплине используются:

- Программный пакет для классической молекулярной динамики «LAMMPS»  
<https://www.lammps.org/>
- Программный комплекс для моделирования ионной имплантации «SRIM»  
<http://www.srim.org/>

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

- программы Microsoft Office;
- издательская система LaTeX;
- 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:

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

а) основная литература

1. Основы конструирования и технологии производства радиоэлектронных средств. Ионно-плазменные технологии: Учебник для вузов / Сигов А. С., Иванов В. И., Лучников

П. А., Суржиков А. П. ; под ред. Сигова А.С. - Москва: Юрайт, 2020. - 270 с.

<https://urait.ru/bcode/490270>

2. Физические методы нанесения нанопокровов : учебное пособие для вузов / В. С. Мухин [и др.] ; под редакцией В. С. Мухина, С. Р. Шехтмана. — 3-е изд., перераб. и доп. — Москва :Издательство Юрайт, 2022. - 333 с

<https://urait.ru/bcode/494749>

б) дополнительная литература

1. Основы конструирования и технологии производства радиоэлектронных средств. Интегральные схемы : учебник для вузов / Ю. В. Гуляев [и др.] ; под редакцией Ю. В. Гуляева. — Москва : Издательство Юрайт, 2020. — 460 с.

<https://urait.ru/bcode/451330>

2. Щука, А. А. Нанoeлектроника : учебник для вузов / А. А. Щука ; под общей редакцией А. С. Сигова. — Москва : Издательство Юрайт, 2022. — 297 с

<https://urait.ru/bcode/490154>

3. Wong C. S., Mongkolnavin R. Elements of Plasma Technology: Springer. - 2016. - 123 p

<https://link.springer.com/book/10.1007/978-981-10-0117-8#toc>

в) ресурсы в сети интернет

1. Открытые ресурсы научной электронной библиотеки eLIBRARY.ru (<http://elibrary.ru/>),

2. Полнотекстовые электронные коллекции Springer (открытые материалы) (<http://link.springer.com/>),

3. Полнотекстовая коллекция журналов Wiley (<https://onlinelibrary.wiley.com/>)

**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 практических занятий (семинаров);
- учебные аудитории для проведения групповых и индивидуальных консультаций;
- учебные аудитории для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации;
- специальное помещение для проведения лабораторных практикумов, оснащенное технологическим оборудованием (линейка химической обработки, установка плазменного травления с источником высокоплотной плазмы, фотолитографическое оборудование, установка плазмостимулированного химического осаждения из газовой фазы, установка магнетронного напыления), контрольно-измерительными приборами (профилометр, эллипсометр, атомно-силовой микроскоп, сканирующий микроскоп).
- помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети «Интернет» и обеспечением доступа к электронной информационно-образовательной среде ЯрГУ.

Автор(ы):

Ассистент Базовая кафедра нанотехнологий  
в электронике в ЯФ ФГБУН ФТИАН им. К.  
А. Валиева РАН

С.В. Курбатов

---

*должность, ученая степень*

---

*подпись*

---

*И.О. Фамилия*



**Приложение № 1 к рабочей программе дисциплины  
«Плазменные технологии в 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**

**Задания для самостоятельной работы**  
*(данные задания выполняются студентом самостоятельно  
и преподавателем в обязательном порядке не проверяются)*

Самостоятельная работа студента по дисциплине «Плазменные технологии в нанoeлектронике», включая контролируемые формы, рассчитана на 35,7 часов в течение учебного семестра. Самостоятельная работа в течение семестра предусматривает подготовку к выполнению лабораторных работ, оформление отчетов по выполненным работам в соответствии с установленными правилами.

**Лабораторные работы**

1. Осаждение тонких пленок методом ВЧ магнетронного распыления.
2. Технология плазменного атомно-слоевого осаждения.
3. Изучение зависимости скорости плазмохимического травления кремния в плазме SF<sub>6</sub> от мощности генератора, давления и расхода рабочего газа.
4. Изучение методов глубокого анизотропного травления кремния
5. Легирования кремния методом ионной имплантации.

По результатам выполнения лабораторных работ студент составляет отчет. Обязательными элементами отчета по лабораторной работе являются:

- титульный лист,
- цель работы;
- теоретические сведения;
- расчетно-графическая часть;
- анализ результатов;
- выводы по работе;
- список используемой литературы.

Оценивание отчета по лабораторной работе осуществляется по двух бальной шкале "зачтено" или "незачтено":

**Оценка «зачтено»** ставится, если учащийся выполняет работу в полном объеме с соблюдением необходимой последовательности проведения опытов и измерений, все

опыты проводит в условиях и режимах, обеспечивающих получение правильных результатов и выводов; соблюдает требования правил безопасности труда; в отчете правильно выполняет все записи, таблицы, рисунки, чертежи, графики, вычисления; правильно выполняет анализ погрешностей.

**Оценка «незачтено»** ставится, если работа выполнена не полностью и объем выполненной части работы не позволяет сделать правильных выводов: если опыты, измерения, вычисления, наблюдения производились неправильно.

## **2. Список вопросов и (или) заданий для проведения промежуточной аттестации**

### **Список вопросов к зачету**

1. Какие применения плазменных процессов в производстве современных ИС вы знаете?
2. Чем вызваны возросшие требования к плазменным процессам в технологии изготовления ИМС?
3. Каковы тенденции совершенствования оборудования для плазменного травления и осаждения? Кластерного оборудования в производстве ИС.
4. Физико-химические процессы в низкотемпературной газовой плазме.
5. Типы и конструкция плазменных реакторов.
6. Основные параметры плазмохимического травления.
7. Каковы механизмы снижения анизотропии и задержки РИТ?
8. Технология плазмохимического травления фоторезиста,  $\text{SiO}_2$  и кремния?
9. Методы глубокого анизотропного травления кремния для производства МЭМС устройств?
10. Объясните снижение ионного потока на дне травимой структуры при увеличении аспектного отношения.
11. Как зависит скорость плазменного травления  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Si}$  во фторуглеродных газах от напряжения смещения, мощности генератора плазмы и расхода рабочего газа?
12. Назовите основные этапы разработки процесса плазменного травления.
13. Классификация методов химического осаждения из газовой фазы. Основные технологические характеристики процессов осаждения.
14. Механизмы плазмостимулированного атомно-слоевого осаждения (АСО). Особенности конструкции технологического оборудования.
15. Химические реагенты (прекурсоры) используются в процессах плазмостимулированного АСО пленок кремния,  $\text{SiO}_2$ , алюминия, титана и нитридов титана?
16. Процессы стимулированного плазмой осаждения тонких пленок из газовой фазы?
17. Какие химические реагенты используются в процессах стимулированного плазмой осаждения пленок кремния,  $\text{SiO}_2$ , алюминия, титана и нитридов титана??
18. Каким образом можно добиться лучшего заполнения топологического рельефа материалами с низкой диэлектрической постоянной?
19. ВЧ магнетронное распыление. Достоинства и недостатки по сравнению с методами осаждения из газовой фазы.
20. Сравнение методов ионно-плазменной и ионно-пучковой имплантации.

### **Правила выставления оценки на зачете.**

До задачи зачета допускаются студенты успешно защитившие лабораторные работы и выполнившие задания промежуточной аттестации. Зачет проводится в устной или письменной форме по билетам. Билет включает два теоретических вопроса. На подготовку к ответу дается не менее 1 часа.

По итогам устного или письменного ответа выставляется одна из оценок: «зачтено» или «незачтено».

**Оценка «зачтено»** выставляется студенту, который демонстрирует глубокое и полное владение содержанием материала дисциплины; осуществляет межпредметные связи; умеет связывать теорию с практикой. Студент дает развернутые, полные и четкие ответы на вопросы экзаменационного билета и дополнительные вопросы, соблюдает логическую последовательность при изложении материала. Грамотно использует терминологию.

**Оценка «незачтено»** выставляется студенту, который демонстрирует разрозненные, бессистемные знания; беспорядочно и неуверенно излагает материал; не умеет выделять главное и второстепенное, не умеет соединять теоретические положения с практикой, не устанавливает межпредметные связи; допускает грубые ошибки при определении сущности раскрываемых понятий, явлений, вследствие непонимания их существенных и несущественных признаков и связей; дает неполные ответы, логика и последовательность изложения которых имеют существенные и принципиальные нарушения, в ответах отсутствуют выводы. Дополнительные и уточняющие вопросы экзаменатора не приводят к коррекции ответов студента. На основную часть дополнительных вопросов студент затрудняется дать ответ или дает неверные ответы.

Оценка «незачтено» выставляется также студенту, который взял билет, но отвечать отказался.

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

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

Основной формой изложения учебного материала по дисциплине являются лекции с использованием демонстрационного эксперимента. По большинству тем предусмотрены лабораторные занятия, на которых происходит закрепление лекционного материала путем его практического применения и отработки экспериментальных навыков.

Для успешного освоения дисциплины очень важна самостоятельная работа студентов над: конспектами прослушанных лекций, разделами курса для самостоятельного изучения и лабораторными работами. Материал, законспектированный на лекциях, необходимо дома еще раз прорабатывать и при необходимости дополнять информацией, полученной на консультациях, лабораторных занятиях или из учебной литературы при самостоятельной проработке разделов курса.

Для проверки и контроля усвоения теоретического материала, приобретенных практических навыков работы и проведения расчетов, в течение обучения проводятся мероприятия текущей аттестации в виде отчетов по лабораторным работам. По разбору заданий для самостоятельной работы и лабораторным работам проводятся консультации. Для самостоятельной работы рекомендуется использовать основную и дополнительную учебную литературу.