

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

_____ И. С. Огнев
(подпись)

« ____ » _____ 20 ____ г.

Рабочая программа дисциплины
«Вакуумная и криогенная техника»

Направление подготовки

11.04.04 Электроника и наноэлектроника

Направленность (Профиль)

«Интегральная электроника и наноэлектроника»

Форма обучения

очная

Программа рассмотрена
на заседании базовой кафедры
нанотехнологий в электронике
протокол № 8 от «30» марта 2023 г.

Программа одобрена НМК
физического факультета

протокол № ____ от « ____ » _____ 2023 г.

Ярославль

1. Цели освоения дисциплины

Целями освоения дисциплины «Вакуумная и криогенная техника» является изучение теоретических и прикладных основ вакуумной и криогенной техники, принципа действия и конструкции устройств для получения низких давлений и температур, способов измерения низких давлений и температур, областей применения вакуумной и криогенной техники, способов расчета и моделирования вакуумных и криогенных систем.

2. Место дисциплины в структуре ОП магистратуры

Дисциплина «Вакуумная и криогенная техника» относится к вариативной (дисциплины по выбору) части профессионального цикла (Б1) основной общеобразовательной программы 11.04.04 «Электроника и нанoeлектроника».

Освоение данной дисциплины во многом основывается на знаниях, полученных в базовых курсах общей физики и химии по вопросам молекулярно-кинетической теории газов, термодинамики и статистической физики. Необходимо знать основные газовые законы, основные законы термодинамики, процессы диффузии газов. Необходимо уметь определять распределение молекул по скоростям, определять среднюю длину свободного пробега молекул, кинетическую энергию молекул.

Дисциплина «Вакуумная и криогенная техника» является предшествующей для изучения дисциплин «Плазменные технологии в нанoeлектронике», «Технологии тонких пленок и покрытий» и «Методы анализа поверхности», а также других дисциплин, связанных с использованием вакуумной и криогенной техники.

3. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения ОП магистратуры

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 (код и формулировка)	Индикатор достижения компетенции (код и формулировка)	Перечень планируемых результатов обучения
Профессиональные компетенции		
ПК-4. Способен к организации и проведению экспериментальных исследований с применением современных средств и методов	<p>ИД_ПК-4.1. Знает способы организации и проведения экспериментальных исследований.</p> <p>ИД_ПК-4.2. Способен самостоятельно проводить экспериментальные исследования.</p> <p>ИД_ПК-4.3. Демонстрирует навыки проведения исследований с применением современных средств и методов</p>	<p>Знать:</p> <ul style="list-style-type: none"> • физические принципы работы вакуумной и криогенной техники; • методы измерения вакуума, низких и сверхнизких температур; • особенности конструкции и специфику работы основных элементов вакуумных и криогенных систем; • современные методы автоматизации эксперимента; <p>Уметь:</p> <ul style="list-style-type: none"> • ориентироваться в современных аналитических и технологических установках, использующих вакуумную и/или криогенную технику, понимать физически принципы их работы; • проводить экспериментальные измерения с использованием современных измерительных комплексов; <p>Владеть:</p> <ul style="list-style-type: none"> • методами планирования и проведения исследований и экспериментов для определения основных параметров вакуумной и криогенной техники; • практическими навыками в работе с вакуумной техникой и криогенной техникой, интегрированной в разнообразные технологические установки.

4. Объем, структура и содержание дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 1 зачетную единицу, 144 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)
			Контактная работа	

			лекции	практические	лабораторные	Консультации	аттестационные испытания	самостоятельная работа	
1	Теоретические основы вакуумной и криогенной техники	1	4					10	Тестирование
2	Физические принципы работы вакуумных насосов	1	4		10	1		10	Защита лабораторных работ № 1-3
3	Основные элементы вакуумных систем	1	4		8	1		5	Защита лабораторной работы № 6
4	Способы измерения вакуума и течеискание	1	2		10	1		10	Реферат, защита лабораторных работ № 4-5
5	Физические основы криогенной техники	1	2		8			4	Защита лабораторной работы № 7
6	Методы компьютерного моделирования	1	2					10	Опрос
	Всего за 1 семестр								
	Экзамен					2	36		Экзамен
	Всего		18		36	5	36	49	

Содержание разделов дисциплины:

1. Теоретические основы вакуумной и криогенной техники

Закон распределения молекул по скоростям. Давление газа с точки зрения молекулярно-кинетической теории. Закон Дальтона. Единицы давления. Число молекул, ударяющихся о стенку, их средняя энергия. Процессы переноса в газах. Кинетические характеристики молекулярного движения. Поперечное сечение. Средняя длина свободного пробега. Частота столкновений. Общее уравнение переноса. Основное уравнение вакуумной техники. Методы получения (ожижения) криогенных жидкостей. Свойства твердых тел при низких температурах.

2. Физические принципы работы вакуумных насосов

Понятие о степенях вакуума. Вакуумные насосы и их классификация. Основные характеристики вакуумных насосов. Определение быстроты действия вакуумных насосов. Объемная откачка. Вращательные насосы. Принцип газового балласта. Рабочие жидкости вакуумных насосов. Сервисное оборудование вакуумных насосов. Пароструйная откачка. Диффузионные и бустерные насосы. Рабочие жидкости для пароструйных насосов. Сервисное оборудование пароструйных насосов. Молекулярная откачка. Насос Геде. Турбомолекулярные насосы. Ионно-сорбционная откачка. Криогенная откачка.

3. Основные элементы вакуумных систем

Конструктивные элементы вакуумных систем. Общие сведения, разъемные и неразъемные соединения, вентили, клапаны, вспомогательное оборудование. Откачные

вакуумные системы, принципы конструирования и расчета вакуумных систем, особенности вакуумных систем для электронной технологии. Шлюзовые системы в вакуумном оборудовании, виды шлюзовых систем, закрытые, открытые, полукрытые и комбинированные системы. Использование шлюзовых систем в вакуумном оборудовании.

4. Способы измерения вакуума и течеискание

Классификация приборов для измерения низких давлений. Механические манометры. Деформационные и жидкостные манометры. Радиометрический манометр. Тепловые и ионизационные манометры. Магнитный и времяпролетный масс спектрометр. Течеискание. Требования к герметичности вакуумных систем. Вакуум-метрический, галоидный, масс-спектральный методы течеискания.

5. Основы криогенной техники

Свойства жидкого гелия-4 и гелия-3. Получение низких и сверхнизких температур. Криогенная техника. Материалы криогенных систем, тепловая изоляция, сосуды для хранения и транспортировки криогенных жидкостей, криостаты. Термометрия. Первичные и вторичные термометры.

6. Методы компьютерного моделирования

Основные методы численного решения дифференциальных уравнений. Методы минимизации функций многих переменных. Метод молекулярной динамики. Метод моделирования Монте-Карло.

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.

Практическое занятие—занятие, посвященное освоению конкретных умений и навыков и закреплению полученных на лекции знаний.

Лабораторные работы - организация учебной работы с реальными материальными и информационными объектами, экспериментальная работа с аналоговыми моделями реальных объектов и физических явлений.

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

В процессе осуществления образовательного процесса используются:

- для формирования текстовых и графических материалов промежуточной и текущей аттестации – программы Microsoft Office, графический редактор Inkscape;
- для поиска учебной литературы библиотеки ЯрГУ – Автоматизированная библиотечная информационная система "БУКИ-NEXT" (АБИС "Буки-Next").

7. Перечень основной и дополнительной учебной литературы, ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины

а) основная литература

1. Шешин Е. П. Вакуумные технологии: [учеб. пособие]. / Е. П. Шешин - Долгопрудный: Интеллект, 2009. - 501 с.
2. Шестак В.П. Вакуумная техника. Концепция разреженного газа. / В.П. Шестак - Москва: МИФИ, 2012. - 272 с.
3. Архаров А.М. Теория и расчет криогенных систем / А.М. Архаров, И.В. Марфенина, И.Е. Марфулин. – М.: Машиностроение, 1978.– 415 с.

б) дополнительная литература

1. Нестеров С. Б. Методы расчета сложных вакуумных систем / С. Б. Нестеров, [и др.]. М: Техносфера, 2012. – 375 с.
2. Розанов Л.Н. Вакуумная техника. – М.: Высшая школа, 1990. – 320 с.
3. Демихов К.Е. Теоретические основы вакуумной техники. / К.Е. Демихов; Никулин Н. К; Калинин Д. А - Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. - 64 с.

В) Электронные ресурсы в сети «Интернет»

1. Электронная библиотека учебных материалов ЯрГУ (http://www.lib.uni-yar.ac.ru/opac/bk_cat_find.php).
2. Информационная система "Единое окно доступа к образовательным ресурсам" (<http://www.edu.ru> (раздел Учебно-методическая библиотека) или по прямой ссылке <http://window.edu.ru/library>).

8. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине

Аудитории, оборудованные для проведения лекций, практических занятий и консультаций, фонд библиотеки, компьютерная техника, лабораторное оборудование и технологические установки с вакуумной и криогенными системами.

Автор:

Ассистент базовой кафедры
нанотехнологий в электронике

(подпись) С.В. Курбатов

**Приложение №1 к рабочей программе дисциплины
«Вакуумная и криогенная техника»**

**Фонд оценочных средств
для проведения текущей и промежуточной аттестации студентов
по дисциплине**

**1. Типовые контрольные задания или иные материалы,
необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности,
характеризующих этапы формирования компетенций**

**1.1. Контрольные задания и иные материалы,
используемые в процессе текущей аттестации**

Темы рефератов:

1. Градуировка манометров. Методы изотермического расширения, постоянного объема, переменной проводимости.
2. Механические деформационные и жидкостные манометры.
3. Тепловые манометры.
4. Измерение высокого вакуума. Ионизационные манометры.
5. Радиометрический манометр.
6. Измерение парциальных давлений. Основные параметры и принцип действия магнитного масс-спектрометра.
7. Течеискание. Требования к герметичности вакуумных систем.
8. Вакуумметрический и галоидный методы течеискания.
9. Масс-спектральный метод течеискания.

Перечень заданий для выполнения в лабораторном практикуме:

1. Исследование характеристик механического вакуумного насоса.
2. Исследование характеристик диффузионного вакуумного насоса.
3. Исследование характеристик высоковакуумного насоса.
4. Приборы для измерения вакуума.
5. Изучение техники течеискания.
6. Вакуумные системы в технологических установках.
7. Криогенные системы и методы измерения низких температур.

Тест

- 1. Максимуму функции распределения молекул по скоростям соответствует**
 1. средняя квадратичная скорость
 2. скорость теплового движения молекул
 3. средняя арифметическая скорость
 4. наиболее вероятная скорость
 5. нет правильного ответа
- 2. Функция распределения частиц по скоростям показывает долю частиц, скорости которых**
 1. больше наиболее вероятной

2. меньше наиболее вероятной
3. лежат в интервале скоростей от V до $V+dV$
4. равны среднеквадратичной
5. нет правильного ответа

3. Среднюю арифметическую скорость молекул можно определить по формуле:

- | | | | |
|----|--------------------------------|----|-----------------------------|
| 1. | $V = \sqrt{\frac{kT}{3\pi m}}$ | 4. | $V = \sqrt{\frac{8kT}{RM}}$ |
| 2. | $V = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}$ | 5. | $V = \sqrt{\frac{8kT}{m}}$ |
| 3. | $V = \sqrt{\frac{2kT}{m}}$ | | |

4. Молекула после удара о стенку отлетает от нее

1. под углом падения
2. по нормали к поверхности стенки
3. преимущественно вдоль поверхности
4. в направлении обратном направлению падения
5. нет правильного ответа

5. Длина свободного пробега частицы – это

1. средний путь между двумя последовательными соударениями
2. средний путь за единицу времени
3. максимальный путь, пройденный за единицу времени
4. путь, при прохождении которого вероятность столкновения частиц равна единице
5. полный путь за единицу времени

6. Формула Сазерленда учитывает влияние

1. массы молекулы на давление
2. температуры на среднюю скорость
3. массы молекулы на наиболее вероятную скорость
4. давления на скорость частицы
5. температуры на сечение соударения частиц

7. Закон Дальтона выполняется

1. для любых газов
2. для любых химически взаимодействующих газов
3. только для химически не взаимодействующих газов
4. только для атомарных газов
5. только для молекулярных газов

8. Предельный вакуум механического вращательно-масляного двухступенчатого насоса составляет

1. 10^{-8} мм рт.ст.
2. 10^{-3} мм рт.ст.
3. 10^0 мм рт.ст.
4. 10^1 мм рт.ст.
5. 10^3 мм рт.ст.

9. С какого давления можно запускать пароструйный насос

1. С атмосферного давления
2. С давления выше атмосферного
3. С давления менее 0,001 мм.рт.ст.
4. С давления менее 0,1 мм.рт.ст.
5. С любого давления

1.2. Список вопросов и (или) заданий для проведения промежуточной аттестации

Список вопросов к экзамену:

1. Основные понятия кинетической теории разреженных газов, основные положения. Закон распределения молекул по скоростям.
2. Давление газа с точки зрения молекулярно-кинетической теории. Закон Дальтона. Единицы давления.
3. Число молекул, ударяющихся о стенку, их средняя энергия.
4. Кинетические характеристики молекулярного движения. Понятие сечения и средней длины свободного пробега. Распределение молекул по длинам свободного пробега.
5. Процессы переноса в газах. Виды процессов переноса. Общее уравнение переноса. Вязкость.
6. Диффузионное движение. Нестационарная диффузия. Взаимная диффузия и самодиффузия.
7. Явления переноса при низких давлениях. Разность давлений между различно нагретыми частями газа. Эффузия.
8. Понятие о степенях вакуума и скорости откачки. Основное уравнение вакуумной техники.
9. Классификация вакуумных насосов и их основные характеристики. Методы определения скорости действия насоса.
10. Течение газа по трубопроводам. Методика расчета пропускной способности сложного трубопровода
11. Объемная откачка. Вращательные вакуумные насосы. Принцип газового балласта. Рабочие жидкости вакуумных насосов.
12. Физические принципы пароструйной откачки. Диффузионные, эжекторные и бустерные насосы. Рабочие жидкости и сервисное оборудование для пароструйных насосов.
13. Молекулярная откачка. Конструкция и принцип действия турбомолекулярного насоса.
14. Насосы ионно-сорбционного типа. Геттерные, орбитронные и магнитроразрядные насосы.
15. Сорбция при низких температурах. Криогенные насосы. Классификация, принцип действия.
16. Классификация приборов для измерения вакуума. Жидкостные манометры.
17. Вакуумметры для измерения среднего вакуума. Механические деформационные и тепловые манометры.
18. Измерение высокого вакуума. Ионизационные манометры.
19. Градуировка манометров. Методы изотермического расширения, постоянного объема, переменной проводимости.
20. Измерение парциальных давлений. Основные параметры масс-спектрометров. Принцип действия магнитного масс-спектрометра.
21. Течеискание. Требования к герметичности вакуумных систем. Методы течеискания. Пробные вещества для течеискания и критерии их выбора.
22. Конструктивные элементы вакуумных систем. Общие сведения, разъёмные и неразъёмные соединения.
23. Коммутационная вакуумная аппаратура: вентили, клапаны, вспомогательное оборудование.
24. Методы получения (ожижения) криогенных жидкостей.
25. Свойства твердых тел при низких температурах.
26. Криогенная техника.

- 27. Свойства жидкого гелия-4 и гелия-3.
- 28. Получение низких и сверхнизких температур.
- 29. Термометрия. Первичные и вторичные термометры.

Приложение №2 к рабочей программе дисциплины «Вакуумная и криогенная техника»

Методические указания для студентов по освоению дисциплины

Основной формой изложения учебного материала по дисциплине «Вакуумная и криогенная техника» являются лекции, кроме того значительный объем материала выносится на самостоятельный разбор. Для освоения теоретического материала предусмотрены практические занятия и лабораторные работы, на которых происходит закрепление навыков расчета простых вакуумных и криогенных систем, а также получить базовые навыки работы с вакуумной и криогенной техникой.

Для успешного освоения дисциплины очень важно знать физические основы вакуумной (криогенной) техники, а также получить практические навыки работы, как с вакуумными (криогенными) системами, так и отдельными её элементами. Для этого необходимо разобрать основные теоретические вопросы, касающиеся данной дисциплины, разобрать основные особенности конструкции вакуумной (криогенной) техники. Для понимания работы вакуумной (криогенной) техники необходимо знать и понимать лекционный материал. Поэтому в процессе изучения дисциплины рекомендуется регулярное повторение пройденного лекционного материала. Материал, законспектированный на лекциях, необходимо дома еще раз прорабатывать и при необходимости дополнять информацией, полученной на консультациях, практических занятиях или из учебной литературы.

Большое внимание должно быть уделено лабораторным работам. В ходе их выполнения, студенты приобретают необходимые практические навыки работы с вакуумной (криогенной) техникой и, учатся самостоятельно обрабатывать и интерпретировать экспериментальные данные.

Для лучшего понимания роли, места и ограничений вакуумной и криогенной техники необходимо достаточно подробно разобрать несколько примеров технологического и аналитического оборудования, в которых предусмотрено использование вакуума и сверхнизких температур.

Для проверки и контроля усвоения материала дисциплины, в течение обучения проводятся мероприятия текущей аттестации в виде тестирования (в аудитории), доклада на выбранную тему и зачеты лабораторных работ.

Зачет принимается по билетам, в письменной форме, каждый из которых включает в себя два теоретических вопроса. На самостоятельную подготовку к зачету выделяется более 3 дней, по необходимости проводится консультация.

Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов по дисциплине «Вакуумная и криогенная техника»

Для самостоятельной работы рекомендуется использовать следующую учебную литературу:

а) основная литература

1. Шешин Е. П. Вакуумные технологии: [учеб. пособие]. / Е. П. Шешин - Долгопрудный: Интеллект, 2009. - 501 с.
2. Шестак В.П. Вакуумная техника. Концепция разреженного газа. / В.П. Шестак - Москва: МИФИ, 2012. - 272 с.

3. Архаров А.М. Теория и расчет криогенных систем / А.М. Архаров, И.В. Марфенина, И.Е. Марфулин. – М.: Машиностроение, 1978.– 415 с.

б) дополнительная литература

1. Нестеров С. Б. Методы расчета сложных вакуумных систем / С. Б. Нестеров, [и др.]. М: Техносфера, 2012. – 375 с.
2. Розанов Л.Н. Вакуумная техника. – М.: Высшая школа, 1990. – 320 с.
3. Дешман С. Научные основы вакуумной техники. – М.: Мир, 1963.
4. Демихов К.Е. Теоретические основы вакуумной техники. / К.Е. Демихов; Никулин Н. К; Калинин Д. А - Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. - 64 с.
5. Дж. Уэстон, Техника сверхвысокого вакуума, М, Мир, 1988.
6. Кузьмин В.В., Аляев В.А. Техника измерения вакуума / монография. - Казань: Изд-во Казан.гос.технол. ун-та, 2009. - 300 с.
7. Шатохин В.Л. Технология вакуумных систем: Учебное пособие. М.: МИФИ, 2000.

**. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»,
рекомендованных к использованию при освоении дисциплины**

1. Электронная библиотека учебных материалов ЯрГУ
(http://www.lib.uni Yar.ac.ru/opac/bk_cat_find.php).
2. Электронно-библиотечная система «Университетская библиотека online»
(www.biblioclub.ru).
3. Открытые ресурсы научной электронной библиотеки eLIBRARY.ru.
4. Полнотекстовые электронные коллекции Springer (открытые материалы)
<http://link.springer.com/>,
5. Научная библиотека открытого доступа «КИБЕРЛЕНИНКА».