

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	5
Список сокращений	7
Термины и определения	8
1. КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ	10
1.1. Назначение и место высоковакуумных технологических процессов в приборостроении	10
1.1.1. Обезгаживающий прогрев и отжиг	11
1.1.2. Осаждение тонкопленочных покрытий	11
1.1.3. Ионное травление	13
1.1.4. Электронная и ионная литография	14
Тесты к лекции 1	15
1.2. Физическая сущность вакуума и его свойства	16
1.2.1. Давление газа. Тепловые скорости молекул	16
1.2.2. Объем газа, ударяющегося о единицу поверхности в единицу времени	17
1.2.3. Длина свободного пробега молекул	18
1.2.4. Степени вакуума	19
Тесты к лекции 2	20
1.3. Термовакuumные процессы	21
1.3.1. Физические Процессы в вакууме	21
1.3.2. Растворимость газов в твердом теле	21
1.3.3. Диффузия газов в твердых телах. Законы Фика	22
Тесты к лекции 3	24
1.4. Создание вакуумной среды	25
1.4.1. Получение вакуума различных степеней	25
1.4.2. Основное уравнение вакуумной техники	26
1.4.3. Определение времени откачки	27
1.4.4. Дополнительные источники газа в вакуумной системе	29
Тесты к лекции 4	30
1.5. Низковакуумные средства откачки	31
1.5.1. Пластинчато-роторные насосы	31
1.5.2. Спиральные вакуумные насосы	32
1.5.3. Винтовые насосы	34
1.5.4. Двухроторные насосы (насосы Рутса)	34
Тесты к лекции 5	36
1.6. Высоковакуумные средства откачки	37
1.6.1. Диффузионные насосы	37
1.6.2. Молекулярные насосы	39
1.6.3. Сорбционные насосы	40
1.6.4. Криосорбционные насосы	41

1.6.5. Ионные насосы	43
Тесты к лекции 6	45
1.7. Средства измерения вакуума и вспомогательные элементы вакуумных систем	46
1.7.1. Средства измерения вакуума	46
1.7.2. Вспомогательные элементы вакуумных систем	48
Тесты к лекции 7	53
1.8. Формирование электронных потоков	54
1.8.1. Электронные пучки	54
1.8.2. Термоэлектронная эмиссия	56
1.8.3. Фотоэлектронная эмиссия	57
1.8.4. Автоэлектронная эмиссия	57
Тесты к лекции 8	58
1.9. Взаимодействие электронных потоков с материалами	59
1.9.1. Эффекты взаимодействия электронных пучков с материалом	59
1.9.2. Параметры электронных пучков	63
Тесты к лекции 9	64
1.10. Формирование ионных потоков и их взаимодействие с материалами	65
1.10.1. Ионные источники	65
1.10.2. Взаимодействие ионных пучков с материалами	67
Тесты к лекции 10	71
1.11. Формирование атомарных и молекулярных потоков	73
1.11.1. Формирование атомарных и молекулярных потоков испарением	73
1.11.2. Формирование атомарных и молекулярных потоков ионным распылением	74
Тесты к лекции 11	75
1.12. Взаимодействие атомарных и молекулярных потоков с материалами	77
1.12.1. Адгезия	77
1.12.2. Тонкопленочные покрытия	77
Тесты к лекции 12	81
1.13. Тлеющий разряд в вакууме	82
1.13.1. Применение газоразрядной плазмы	82
1.13.2. Параметры газоразрядной плазмы	83
1.13.3. Кривые Пашена	85
Тесты к лекции 13	86
1.14. Дуговой разряд в вакууме	87
1.14.1. Переход из тлеющего разряда в дуговой	87
1.14.2. Параметры дугового разряда	88
Тесты к лекции 14	91
1.15. Методы нанесения тонких пленок	92
1.15.1. Классификация методов нанесения тонких пленок	92

1.15.2. Характеристики методов нанесения тонких пленок	95
Тесты к лекции 15	99
1.16. Геометрические характеристики и физические свойства тонких пленок.	100
1.16.1. Толщина пленки и ее неравномерность по диаметру подложки	100
1.16.2. Неравномерность толщины пленки. Закон Кнудсена	101
1.16.3. Однородность состава тонкопленочного покрытия.	102
Тесты к лекции 16	104
1.17. Вакуумное технологическое оборудование	105
1.17.1. Составные части типового вакуумного технологического оборудования.	105
1.17.2. Оборудование для вакуумного осаждения тонкопленочных покрытий	106
1.17.3. Оборудование для ионного травления	108
1.17.4. Оборудование для обезгаживающего прогрева и отжига.	109
Тесты к лекции 17	109
2. МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ	110
2.1. Методические указания по выполнению лабораторных работ	110
2.1.1. Лабораторная работа № 1. Формирование вакуумной среды и измерение ее параметров	110
Контрольные вопросы и задания	113
2.1.2. Лабораторная работа № 2. Тлеющий разряд в вакууме	114
Контрольные вопросы	121
2.1.3. Лабораторная работа № 3. Формирование тонких пленок методами термического испарения и магнетронного распыления	122
Контрольные вопросы	127
2.1.4. Лабораторная работа № 4. Исследование геометрических и физических характеристик тонких пленок	128
Контрольные вопросы	133
2.2 Методические указания по выполнению домашнего задания	134
2.2.1. Теоретическая часть	134
2.2.2. Практическая часть	138
2.2.3. методические указания по оформлению домашнего задания	140
3. НОРМАТИВНАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ	141
3.1. Нормативная документация по дисциплине	141
3.1.1. Примерная базовая программа дисциплины	141
Раздел 1. Цели и задачи дисциплины	142
Раздел 2. Знания, умения и навыки, получаемые после освоения дисциплины.	142
Раздел 3. Объем дисциплины по видам учебных занятий	143
Раздел 4. Содержание дисциплины	143
Раздел 5. Лабораторные работы	146

Раздел 6. Самостоятельная работа.	147
Раздел 7. Курсовой проект, курсовая работа	147
Раздел 8. Учебно-методические материалы.	147
3.2. Структура и состав фондов оценочных средств по дисциплине	149
3.2.1. Перечень вопросов для рейтинговых и контрольных мероприятий	149
3.2.2. Варианты экзаменационных билетов	151
3.3. Спецификация учебных видео- и аудиоматериалов, слайдов, эскизов плакатов и других дидактических материалов	155
Заключение	161
Литература	163
Приложение Рабочая тетрадь	164
П.1. Формирование вакуумной среды и измерение ее параметров	165
1. Краткий конспект теоретической части.	167
2. Результаты измерений.	169
3. Анализ экспериментальных данных	169
4. Выводы.	169
5. Контрольные вопросы	170
П.2. Тлеющий разряд в вакууме	171
1. Краткий конспект теоретической части.	173
2. Результаты измерений.	174
3. Построение экспериментальной зависимости краевого угла смачивания от времени обработки	175
4. Анализ результатов.	175
5. Выводы.	176
6. Контрольные вопросы	176
П.3. Формирование тонких пленок методами термического испарения и магнетронного распыления.	177
1. Краткий конспект теоретической части.	179
2. Формирование покрытия методом термического испарения	181
3. Формирование покрытия методом магнетронного распыления	182
4. Выводы.	183
5. Контрольные вопросы	183
П.4. Исследование геометрических и физических характеристик тонких пленок.	184
1. Краткий конспект теоретической части.	186
2. Результаты измерений	187
3. Сравнение измеренной толщины и рассчитанной.	188
4. Результаты измерения адгезии.	188
5. Сравнение адгезии тонкопленочного покрытия, полученного разными методами	188
6. Выводы.	189
7. Контрольные вопросы	189
П.5. Методика формирования тонких пленок методом магнетронного распыления на установке MANTIS QPREP 500.	190

Учебное издание

Артемьев Борис Викторович
Костиков Владимир Григорьевич
Шахнов Вадим Анатольевич

**ВЫСОКОВАКУУМНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
В ПРИБОРОСТРОЕНИИ**

Редактор *Л.Т. Мартыненко*
Художник *Я.М. Асинкритова*
Корректор *Ю.Н. Морозова*
Компьютерная графика *О.В. Левашовой*
Компьютерная верстка *И.Д. Звягинцевой*

Оригинал-макет подготовлен
в Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана.

В оформлении использованы шрифты
Студии Артемия Лебедева.

Подписано в печать ==.==.2023. Формат 70×100/16. Бумага офсетная.
Усл. печ. ==,== л. Тираж === экз.

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, г. Москва, улица 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.
info@bmstu.press
<https://bmstu.press>

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, г. Москва, улица 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.
baumanprint@gmail.com