

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю.А.»

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и инновациям

 А.И. Землянухин

«22» декабря 2025 г.



ПРОГРАММА-МИНИМУМ
КАНДИДАТСКОГО ЭКЗАМЕНА ПО СПЕЦИАЛЬНОСТИ
2.2.1 «Вакуумная и плазменная электроника»

Саратов 2025

Введение

В основу настоящей программы положены следующие вузовские дисциплины: “Основы вакуумной электроники”, “Физические основы электронной техники”, “Электронные и ионные приборы”, “Техника и приборы СВЧ”, “Технология и автоматизация производства электровакуумных и газоразрядных приборов”.

Программа является универсальной по физико-математическим и техническим наукам. При сдаче кандидатского минимума по физико-математическим наукам основное внимание следует уделять выявлению знаний соискателей по теоретическим аспектам рассматриваемых вопросов. При сдаче кандидатского минимума по техническим наукам - знанию технических и технологических аспектов решения конкретных задач и пониманию основных закономерностей теоретических вопросов.

Программа разработана МФТИ при участии ФГУП “НПП ”Торий”, ФГУП “НПО ”Исток” и одобрена экспертным советом по электронике, измерительной технике, радиотехнике и связи Высшей аттестационной комиссии.

1. Физические основы вакуумной и плазменной электроники

Кинетическая теория газов. Закон идеального газа. Число Авогадро. Скорость молекул. Закон распределения Максвелла-Больцмана. Свободный пробег молекул. Скорость испарения и давление пара. Теплопроводность газов при низких давлениях. Течение газов через трубы и отверстия.

Электрические явления в разреженных газах. Ионизация, возбуждение и рекомбинация газовых частиц. Эффективные сечения процессов. Движение заряженных частиц в газе.

Газовый разряд. Классификация типов газового разряда и отдельных его областей. Условия развития разряда. Кривые Пашена. Высокочастотный разряд. Явления в вакуумных и плазменных приборах. Взаимодействие электронов с твердыми телами. Рентгеновское излучение. Глубина проникновения электронов в твёрдое тело. Прохождение электронов сквозь тонкую фольгу. Взаимодействие ионов с твердыми телами. Катодное распыление твердых тел, его закономерности.

Эмиссионная электроника. Термоэлектронная эмиссия. Распределение термоэлектронов по скоростям. Вторичная, фотоэлектронная, автоэлектронная и экзоэлектронная эмиссии. Формулы описывающие основные виды эмиссии. Эмиссия электронов под действием положительных ионов и нейтральных атомов. Эмиссия электронов из плазмы. Взрывная эмиссия.

Катоды: термоэлектронные, автоэлектронные (полевые), фотоэлектронные, вторично-эмиссионные. Динамическое равновесие в катодах. Стабильность эмиссии и срок службы главных конструктивно-технологических вариантов катодов. Подогреватели и процессы в них. Плазменные источники электронов. Плазменные источники ионов. Методы подавления термоэмиссии и вторичной электронной эмиссии.

Движение заряженных частиц в вакууме в электрических и магнитных полях. Движение при скорости, близкой к скорости света. Фокусирующее и расфокусирующее действие электростатических и магнитостатических полей.

Электродинамика. Уравнение Максвелла. Основные характеристики электромагнитного поля и среды.

Волноведущие системы и резонаторы в электронных приборах. Их основные свойства.

Замедляющие системы в электронных приборах (Спираль, Гребенка, Цепочка связанных резонаторов). Сопротивление связи. Дисперсионная характеристика. Полосы прозрачности и непрозрачности. Согласование замедляющих систем с волноводами. Возбуждение замедляющих систем. Автоматизированное проектирование электродинамических систем и устройств.

2. Электронные приборы и устройства, основанные на движении заряженных частиц в вакууме и газах.

Электровакуумные приборы (ЭВП). Приборы с электростатическим управлением. Токопрохождение в вакуумном промежутке. Плоский диод. Распределение потенциала. Прохождение предварительно ускоренных электронов в плоском промежутке. Минимум потенциала и виртуальный катод.

Сеточное управление. Триоды, тетроды, клистроды. Частотные ограничения и пути их преодоления. Основные свойства и характеристики приборов с электростатическим управлением. Вакуумные вентили. Дугогасительные вакуумные камеры.

Плазменные приборы (ППП). Принцип действия, конструкция и характеристики плазменных приборов. Приборы тлеющего разряда. Плазменные панели постоянного тока. Панели переменного тока. Водородные тиратроны. Игнитроны. Резонансные, сверхчастотные и искровые разрядники. Газовые лазеры и мазеры.

Устройства формирования и фокусировки интенсивных электронных потоков. Общие принципы формирования интенсивных электронных потоков.

Электронно-оптические системы (ЭОС), СВЧ приборов О- и М-типа.

Магнитные и электростатические фокусирующие системы. Магнитная периодическая фокусирующая система (МПФС). Магнитная реверсивная фокусировка. Периодическая электростатическая (ПЭФ). Коллекторы. Коллекторы с рекуперацией.

Электронно-лучевые трубки (ЭЛТ) и фотоэлектронные приборы. Конструкция и характеристики электронно-лучевых приборов. Фокусирующие и отклоняющие системы ЭЛТ. Като�олюминесценция. Осциллографические трубки. Экраны осциллографических трубок. Запоминающие трубки. Функциональные трубки. Знаковые индикаторные трубки. Черно-белые и цветные кинескопы и дисплеи. Плазменные дисплеи, дисплеи с автокатадами. Передающие трубки. Электронно-оптические преобразователи. Основные типы фотоэлементов. Фотоэлектронные умножители. Рентгеновские трубки.

Сверхвысокочастотные (СВЧ) электронные приборы. Методы анализа явлений в СВЧ приборах. Исходные уравнения поля и уравнения движения. Конвенционный ток, емкостный ток, наведённый ток,. Взаимодействие потока электронов с полем бегущей волны. Группировка электронов. Волны пространственного заряда. Метод заданного поля и метод заданного тока. Самосоогласованные решения.

Конструкции и параметры СВЧ ЭВП. Основные типы СВЧ приборов, принцип действия, основные характеристики. Конструктивные особенности и характеристики приборов О-типа (ламп с бегущей волной, ламп с обратной волной - ЛОВ, клистронов) и приборов М - типа (магнетронов, амплитронов, ЛОВ). Гироприборы (гиротроны, гироЛБВ, гироклистроны). Автоматизированное проектирование приборов СВЧ.

Шумы в электронных приборах. Происхождение и виды шумов в электронных приборах. Тепловой шум, дробовой шум, шумы токораспределения, фликкер-шум. Эквивалентные шумовые

сопротивления, шумовая температура, коэффициент шума. Методы уменьшения шумов.

Тепловые явления в электронных приборах. Основные источники тепла. Лучистый теплообмен в вакууме. Теплопередача через жидкостные и газовые среды. Свободная и принудительная конвекция. Теплопередача в условиях кипения. Теплопередача теплопроводностью. Стационарный тепловой режим деталей электронных приборов. Поверхностный нагрев. Импульсный нагрев. Время установления теплового режима. Методы автоматизированного проектирования устройств охлаждения в электронных приборах.

3. Материалы узлов и устройств вакуумных и плазменных приборов

Тугоплавкие металлы. Вольфрам, молибден, тантал и др. материалы и их сплавы. Рениевый эффект. Способы получения и очистки тугоплавких металлов и их сплавов. Зонная очистка тугоплавких металлов и сплавов. Их физические и химические свойства. Методы и приборы для контроля их качества. Применение тугоплавких металлов в вакуумной и плазменной электронике.

Благородные металлы. Платина, палладий, родий, осмий, золото, серебро и их сплавы. Применение благородных металлов и их сплавов в вакуумных и плазменных приборах.

Черные и цветные металлы. Никель, железо, медь. Сплавы и композиции черных и цветных металлов. Методы очистки и получения. Вакуумная плавка. Применение для изготовления деталей приборов, ограничения.

Железоникелевокобальтовые, железоникелевохромистые и феррохромовые сплавы. Их применение в приборах.

Щелочные, щелочноземельные металлы. Их применение в вакуумных и газоразрядных приборах.

Окислы щелочноземельных металлов. Применение их для электрофизических насосов.

Припои. Низкотемпературные и высокотемпературные припои. Требования к припоям.

Магнитные материалы. Магнитомягкие материалы. Ферриты. Кристаллические ферромагнетики.

Стекло. Состав, физико-химические свойства. Термическое расширение. Термостойкость. Электропроводность. Диэлектрические потери. Химическая устойчивость. Проницаемость для излучений. Газопроницаемость. Выбор стекла для различных условий применения. Обработка стекла. Ситаллы. Спаи стекла с металлами, оборудование для производства стекла. Оборудование для спаев стекла с металлами. Приборы для контроля качества спаев.

Керамика и другие изоляционные материалы. Виды керамики и изоляционных материалов, используемых в вакуумной и плазменной электронике. Алмаз, нитриды, лейкосапфир. Физико-химические свойства изоляционных материалов. Механические свойства. Термическое расширение. Теплопроводность. Удельное электрическое, объемное и поверхностное сопротивление. Диэлектрические свойства. Оптические свойства. Газопроницаемость. Спаи с металлами. Приборы для контроля физико-химических свойств. Оборудование и производство керамических деталей.

4. Вспомогательные материалы

Люминофоры. Методы и оборудование для их получения. Применение люминофоров для электронно-лучевых приборов,

люминисцирующих экранов и источников света. Методы и оборудование для нанесения люминофоров на подложки.

Эластомеры. Применение эластомеров для герметизации вводов ЭВП и ПЛП.

Газы. Инертные газы. Получение и физические свойства газов. Применение инертных газов в технологии ЭВП и ПЛП. Методы очистки инертных газов.

Активные газы. Водород, азот, кислород и углекислый газ. Физические и химические свойства активных газов. Методы очистки и приборы для контроля чистоты газов. Применение газов в технологии ЭВП и ПЛП.

5. Технология вакуумных и плазменных приборов и специальное оборудование

Изготовление металлических деталей ЭВП и ПЛП. Изготовление деталей из проволок, лент и прутков. Холодная штамповка, обточка, фрезерование, выдавливание, навивка спиралей. Смазки, применяемые при изготовлении деталей. Оборудование, приборы и инструмент, используемые при изготовлении деталей ЭВП. Способы и оборудование для обработки поверхности деталей. Травление, пескоструйная обработка, голтовка, полировка, карбоназация, осаждение покрытий из электролитов и из газовой среды. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. Электрохимическая и анодно-механическая обработка. Отжиг для снятия механических напряжений.

Очистка деталей ЭВП и ПЛП. Виды загрязнений деталей ЭВП и ПЛП. Загрязнение деталей механическими частицами и методы борьбы с ними. Оборудование для очистки воздуха от аэрозолей. Приборы для контроля чистоты воздуха. Загрязнение деталей органическими и

неорганическими веществами. Механизм влияния загрязнений на работоспособность ЭВП и ПЛП.

Интенсификация очистки ультразвуком. Очистка стекла и керамики. Оборудование и материалы, используемые для очистки деталей. Контроль солевых и органических загрязнений. Приборы для контроля.

Термические методы очистки деталей. Отжиг в вакууме, в восстановительных и инертных средах. Основные закономерности термического обезгаживания деталей. Влияние на очистку температуры, давления и чистоты газов. Оборудование для отжига деталей. Хранение очищенных деталей. Тара для хранения очищенных деталей.

Изготовление катодов и подогревателей. Способы и оборудование для нанесения эмиссионных и изоляционных покрытий на катоды и подогреватели. Изготовление тугоплавких пористых тел. Пропитка металлопористых катодов эмиссионными составами. Типы эмиссионных составов. Процессы карбидизации торированного вольфрама. Термодиффузионное соединение фольг из драгметаллов с активаторами с тугоплавкими основами. Заплавленные подогреватели. Контроль качества катодов и подогревателей.

Измерение температуры и эмиссионных характеристик катодов. Теплофизические явления в катодах.

Пленочные покрытия и оборудование для их получения. Методы нанесения тонких пленок на детали ЭВП и ПЛП. Термическое электронно-лучевое, магнетронное напыление. Подготовка поверхностей методом ионного травления. Газофазное нанесение пленок тугоплавких металлов. Нанесение металлизационных покрытий на керамические детали. Оборудование для изготовления разных типов пленок.

Методы соединения деталей. Контактная сварка. Аргонодуговая сварка. Электронно-лучевая сварка. Сварка с использованием лазеров.

Термокомпрессионная сварка. Оборудование, используемое для различного вида сварок. Пайка деталей припоями. Многоступенчатая пайка. Пайка в вакууме, в защитных и восстановительных средах. Концентраторная пайка. Оборудование для пайки. Печи периодического и непрерывного действия. Критерии паяемости и свариваемости деталей. Методы и приборы для контроля герметичности сварных и паянных швов. Заварка приборов со стеклянной оболочкой.

Откачка ЭВП и ПЛП. Газы, выделяемые из деталей в процессе откачки. Способы и режим обработки катодов и оболочек приборов. Контроль процесса откачки. Особенности откачки приборов в молекулярном режиме. Откачное оборудование. Автоматы и откачные посты. Обслуживание откачного оборудования. Способы очистки вакуумных систем. Вредные последствия длительного и высокотемпературного обезгаживания ЭВП при откачке. Особенности откачки ПЛП и способы наполнения их газами.

Методы получения вакуума при помощи геттеров. Типы распыляемых и нераспыляемых геттеров. Сорбционные свойства геттеров. Расположение геттеров в приборах. Влияние типа геттера на параметры приборов. Способы активировки геттеров при откачке. Геттерные насосы, их особенности. Особенности откачки приборов, оснащенных встроенными геттерными насосами.

Тренировка ЭВП и ПЛП. Цель тренировки. Импульсные и статические режимы тренировок. Тренировки высоковольтных приборов. Оборудование для тренировки приборов.

Испытание ЭВП и ПЛП. Измерение параметров ЭВП и ПЛП. Механические испытания. Климатические испытания. Испытания на долговечность. Оборудование, применяемое для измерения электрических

параметров ЭВП и ПЛП и испытания их на устойчивость к механическим и климатическим воздействиям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ворончев Т.А., Соболев В.Д. Физические основы электровакуумной техники. М., “Высшая школа”, 1967.
2. Кудинцева Г.А. и др. Термоэлектронные катоды, М., “Энергия”, 1966.
3. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ. Изд. 2-е, М., “Высшая школа”. Т.1, 1970, Т.П., 1972.
4. Батыгин В.Н. и др. Вакуумно-плотная керамика и ее спаи с металлами. М., “Энергия”, 1973.
5. Черепнин Н.В. Основы очистки, обезгаживания и откачки в вакуумной технике. М., “Советское радио”, 1967
6. Жигарев А.А., Шамаева Г.Г. Электронно-лучевые и фотоэлектронные приборы, М., “Высшая школа”, 1982.
7. Царёв Б.М., Расчёт и конструирование электронных ламп, М., “Энергия”, 1967.
8. Алямовский И.В. Электронные пучки и электронные пушки. М., “Советское радио”, 1966.
9. Вакуумные дуги. Теория и приложения. Под редакцией Дж. Лафферти М., “Мир”, 1982.
10. Киселёв А.Б. Металлооксидные катоды электронных приборов. М., МФТИ, 2001.
11. Машиностроение. Энциклопедия, том III-8. Технологии, оборудование и системы управления в электронном машиностроении. М., “Машиностроение”, 2000.

12. Гапонов А.В. и др. “Известия Вузов”, сер. Физика, том 2. №3 стр. 450-462, №5 стр. 836-874.

13. “Гиротрон”, сб. научных трудов 1981,1983,1985гг. под. ред. Гапонова-Грехова А.В.

14. Голант, В. Е. Основы физики плазмы : учеб. пособие / В. Е. Голант, А. П. Жилинский, И. Е. Сахаров. - 2-е изд., испр. и доп. - СПб. ; М. ; Краснодар : Лань, 2011. - 448 с.

15. Битнер Л.Р. Вакуумная и плазменная электроника [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Битнер Л.Р.— Электрон. текстовые данные.— Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2007.— 148 с.

16. Толмачев В.В. Физические основы электроники [Электронный ресурс]/ Толмачев В.В., Скрипник Ф.В.— Электрон. текстовые данные.— Москва, Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, Ижевский институт компьютерных исследований, 2011.— 496 с.

17. Яфаров Р.К. Физика СВЧ вакуумно-плазменных нанотехнологий [Электронный ресурс]/ Яфаров Р.К.— Электрон. текстовые данные.— М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009.— 216 с.

18. Григорьев А. Д. Электродинамика и микроволновая техника : учебник / А. Д. Григорьев. - 2-е изд., доп. - СПб. ; М. ; Краснодар : Лань, 2007. - 704 с. : ил.

19. Фальковский, О. И. Техническая электродинамика : учеб. / О. И. Фальковский. - 2-е изд., стер. - СПб. ; М. ; Краснодар : Лань, 2009. - 432 с. : ил.

20. Соколова Ж.М. Приборы и устройства СВЧ, КВЧ и ГВЧ диапазонов [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Соколова Ж.М.— Электрон. текстовые данные.— Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012.— 283 с.

21. Трубецков Д.И. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Том 1 [Электронный ресурс]/ Трубецков Д.И., Храмов А.Е.— Электрон. текстовые данные.— М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.— 496 с.

22. Трубецков Д.И. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Том 2 [Электронный ресурс]/ Трубецков Д.И., Храмов А.Е.— Электрон. текстовые данные.— М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004.— 647 с.

23. Материалы приборостроения/ Э. Р. Галимов, А. С. Мамина, А. Г. Аблясова и др. / Под общ. ред. Э. Р. Галимова, А. С. Мамина. - М.: КолосС, 2010. - 284 с.: ил.

Заведующий кафедрой

«Электронные приборы и устройства»

А.Ю. Мирошниченко

Руководитель аспирантской программы

А.Ю. Мирошниченко