Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе
_____ / Д.С. Гуц /
«10» марта 2023 г.

ПРОГРАММА
кандидатского экзамена по научной специальности 2.2.2 Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств

Красноярск 2023

1. Физика полупроводников и полупроводниковых приборов

Общие свойства полупроводников. Природа химической связи. Структура кристаллов. Идеальные и реальные кристаллы. Дефекты в кристаллах. Свойства основных монокристаллических материалов микроэлектроники: Si, GaAs и др. Поликристаллические и аморфные полупроводники.

Зонная теория твердого тела. Энергетические спектры электронов в металлах, полупроводниках, диэлектриках. Зона проводимости и валентная зона. Электроны и дырки. Эффективная масса электрона. Экситоны. Собственные и примесные полупроводники. Донорные и акцепторные примеси.

Основы статистической физики. Функция распределения Ферми-Дирака. Концентрация электронов и дырок в зонах и их температурные зависимости. Распределение Максвелла-Больцмана. Критерий вырождения электронного газа. Вырожденные и невырожденные полупроводники.

Рекомбинация носителей заряда. Рекомбинация «зона-зона» и рекомбинация через примеси и дефекты. Теория рекомбинации Шокли-Рида. Диффузионная длина и время жизни носителей. Поверхностная рекомбинация.

Электропроводность полупроводников. Носители заряда в слабом электрическом поле. Взаимодействие с фононами, примесными атомами, дефектами. Подвижность электронов и дырок. Условие электронейтральности. Диффузия и дрейф носителей заряда. Соотношение Эйнштейна. Носители заряда в сильном электрическом поле. Горячие электроны. Лавинное умножение в полупроводниках. Электрические домены и токовые шнуры. Эффект Ганна.

Уравнение для плотности электрического тока в полупроводниках. Уравнение непрерывности. Уравнение Пуассона.

Электронно-дырочный *(p-n)* переход. Инжекция и экстракция неосновных носителей заряда. Вольт-амперная характеристика *p-n* перехода. Токи носителей заряда в *p-n* переходе, квазиуровни Ферми. Генерация и рекомбинация носителей в *p-n* переходе. Барьерная и диффузионная емкость. Частотные и импульсные свойства. Пробой *p-n* перехода: тепловой, лавинный, туннельный.

Транзисторный эффект. Зонная диаграмма полупроводниковой структуры с двумя близко расположенными *p-n* переходами. Коэффициент инжекции. Коэффициент переноса носителей через базу. Коэффициент усиления транзистора.

Контакт металл-полупроводник. Теория Шоттки. Вольт-амперная характеристика. Омический контакт. Сопоставление с *p-n* переходом.

Структура металл-диэлектрик-полупроводник. Зонная диаграмма и ее изменение при приложении напряжения. Роль поверхностных состояний, подвижных и неподвижных зарядов в диэлектрике.

Гетероструктуры. Зонная диаграмма гетеро- *p-n* перехода. Коэффициент инжекции. Суперинжекция. Одинарные и двойные гетероструктуры. Варизонные структуры.

Фотоэлектрические явления в полупроводниках. Поглощение излучения: собственное и примесное, экситонное и на свободных носителях. Закон Бугера. Красная граница поглощения. Фотопроводимость. Спектральная характеристика. Фотовольтаический эффект в *p-n* переходе. Эффекты, вызываемые поглощением высокоэнергетического ядерного излучения в полупроводниках.

Излучение полупроводников. Прямые и непрямые переходы носителей заряда. Виды люминесценции: инжекционная, катодо-, фото- люминесценция. Спектры излучения. Правило Стокса, антистоксова люминесценция. Квантовый выход. Вывод излучения из полупроводников.

Лазерный эффект в полупроводниках. Индуцированное (стимулированное) излучение. Оптический резонатор, усиление и генерация света. Пороговый ток.

Термоэлектрические явления. Термо- и гальваномагнитные эффекты. Эффект Холла.

Электро-, магнито-, акустооптические эффекты. Поверхностные акустические волны. Акустоэлектронные волны.

2. Приборы твердотельной электроники и микроэлектроники

Полупроводниковые диоды. Устройство и основные параметры. Выпрямительные и импульсные диоды. Варикапы. Стабилитроны и защитные диоды. Туннельные диоды. Диоды СВЧ: детекторные и смесительные, диоды Шоттки, pin - диоды, умножительные и параметрические, лавинно-пролетные, диоды Ганна. Полупроводниковые датчики ядерных излучений.

Полупроводниковые транзисторы

Биполярные транзисторы. Принцип действия, основные параметры, их зависимость от температуры. Частотные и импульсные характеристики. Диффузионно-дрейфовые транзисторы. Мощные транзисторы, в том числе СВЧ. Транзисторы с изолированным затвором (IGBT).

Тиристоры и их разновидности. Основные параметры.

Полевые транзисторы, принцип действия, основные параметры. Полевые транзисторы с p-п переходом, с барьером Шоттки. МДП-транзисторы с индуцированным и встроенным каналами *p*- и *n*- типов.

Шумы в транзисторах.

Полупроводниковые интегральные схемы. Транзисторы, диоды и другие элементы в интегральном исполнении. Межэлементная изоляция. ИС, БИС, СБИС. Классификация микросхем по конструктивно-технологическому принципу: МОП- и КМОП-ИС, биполярные (ТТЛ-, ЭСЛ-, $И^2Л$-ИС); Би-КМОП; «кремний-на-изоляторе» («кремний-на-сапфире»)-ИС; GaAs-ИС на полевых транзисторах с барьером Шоттки (ПТШ)

Многослойные (объемные) ИС. Интеграция на пластине. Микросистемы (общее представление).

Микросхемотехника. Цифровые и аналоговые ИС. Базовые логические элементы: ТТЛ, ЭСЛ, МОП, КМОП, ПТШ. Микропроцессоры. Полупроводниковые ЗУ. Программируемые логические матрицы. Базовые матричные кристаллы. ЦАП - АЦП. Сигнальные микропроцессоры. ВИП и стабилизаторы напряжения. Операционные усилители. Специфика интегральных СВЧ-устройств.

Оптоэлектроника.

Фотоприемники: фото- резисторы, -диоды, -транзисторы, -матрицы. Основные параметры и характеристики. Фотоприемники ИК-диапазона, тепловизоры. Фоточувствительные приборы с зарядовой связью. Солнечные батареи: на монокристаллическом и аморфном кремнии, на поликристаллических пленках, с гетероструктурами.

Полупроводниковые лазеры (общее представление).

Светодиоды, параметры и характеристики. Суперяркие светодиоды. ИК- излучатели. Светодиодные дисплеи. Полимерные светодиоды (общее представление).

Оптроны и оптоэлектронные ИС.

Оптические дисковые и голографические ЗУ. Волоконнооптические линии связи. Элементы оптической вычислительной техники. Интегральная оптика.

Акустоэлектроника и акустооптика. Физические основы взаимодействия акустической волны с электронами твердого тела и взаимодействия оптических и акустических волн в твердых телах и жидкостях. Основные материалы акустоэлектроники и акустооптики и устройства на их основе для обработки аналоговых сигналов.

Магнитоэлектроника, криоэлектроника, твердотельные датчики (общее представление).

Краткий очерк истории твердотельных приборов и микроэлектроники. Даты важнейших открытий и изобретений. Ученые, внесшие вклад в развитие твердотельной микроэлектроники и примыкающих к ней областей.

3. Технология микроэлектроники и твердотельных приборов

Планарная технология - общая схема техпроцесса. Групповая обработка. Минимальный топологический размер (МТР) - основной показатель уровня технологии. Степень интеграции ИС. Динамика МТР и степени интеграции, закон Мура. Перспективы развития планарной технологии. Гибридная технология. Микросборки и БИС на подложках.

Изготовление полупроводниковых пластин. Определение кристаллографической ориентации монокристаллов полупроводников. Ориентированная резка, шлифовка, полировка пластин.

Химическое травление и химическая полировка кремния и арсенида галлия. Химико-механическая полировка. Финишная очистка пластин. Методы контроля качества очистки.

Эпитаксия. Методы эпитаксиального выращивания кремния. Методы контроля качества эпитаксиальных слоев. Распределение примесей в эпитаксиальных слоях. Дефекты эпитаксиальных пленок. Получение эпитаксиальных гетеропереходов. Выращивание эпитаксиальных пленок $A^3B^Э$. Оборудование для эпитаксиального выращивания пленок. Сравнение газотранспортной, жидкофазной, МОС-гидридной и молекулярной эпитаксии.

Создание диэлектрических покрытий на кремнии. Термодинамика процесса окисления кремния. Физическая модель процесса окисления кремния. Кинетика активного и пассивного окисления полупроводников. Структура окисла на кремнии. Перераспределение примеси при термическом окислении кремния. Формирование диэлектрических пленок методами осаждения из металлоорганических соединений.

Зарядовое состояние системы полупроводник—диэлектрик; факторы, влияющие на величину и знак заряда в системе. Связь параметров полупроводниковых приборов и ИС с зарядовым состоянием системы кремний—окисел.

Диффузия в полупроводниках. Физические основы процесса диффузии. Основные уравнения. Граничные условия и расчетные формулы для наиболее важных случаев диффузии. Методы проведения диффузионных процессов. Структурные схемы диффузионных печей. Особенности диффузии в соединения $A^JB^?$.

Электронно-ионная технология. Методы получения электронных и ионных пучков. Ионное легирование. Имплантация ионов. Плазмохимические и ионно-плазменные методы обработки полупроводниковых, диэлектрических и металлических слоев. Дефекты, вносимые электронно-ионной обработкой, их устранение. Конструктивные схемы ионных имплантеров и оборудования для электронно-ионной и ионно-химической обработки.

Металлизация. Получение тонких пленок термическим испарением в вакууме. Ионно-плазменное распыление. Химическое осаждение из газовой фазы. Оборудование для получения тонких пленок. Материалы тонкопленочной технологии.

Литография. Фотолитография. Основные типы оборудования для фотолитографии. Проекционная фотолитография, электроннолучевая литография и рентгенолитография. Фотошаблоны и их изготовление. Дефекты микросхем, связанные с фотолитографическими процессами.

Структуры элементов полупроводниковых ИС. Методы изоляции элементов. Технология структур «кремний-на-изоляторе». Структура и свойства элементов ИС.

Сборка полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Корпуса полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Методы герметизации. Бескорпусные приборы. Методы отвода тепла в мощных полупроводниковых приборах.

4. Моделирование, испытания, надежность приборов твердотельной электроники, радиоэлектроники и изделий микро- и наноэлектроники

Моделирование как основа проектирования приборов твердотельной, микро- и наноэлектроники. Методики построения физических и математических моделей. Двух- и трехмерное моделирование. Примеры моделей транзисторов, элементов микросхем. Сис-

темы моделирования и автоматизированного проектирования (общее представление).

Испытание изделий на устойчивость к воздействию внешних факторов: механических, климатических, радиационных, Виды испытаний: приемосдаточные, периодические, квалификационные. Особенности поведения полупроводниковых приборов и микросхем при различных видах радиационных и космических воздействий. Методы повышения радиационной стойкости приборов.

Основные положения, понятия и определения современной теории надежности. Статистические методы оценки и прогнозирования показателей надежности и долговечности. Физика причин отказов полупроводниковых приборов и микросхем. Катастрофические (внезапные) и деградационные (постепенные) отказы. Методы выявления потенциально ненадежных приборов и микросхем. Ускоренные испытания и имитационные методы испытаний.

5. Радиоэлектронные компоненты

Физические явления, определяющие электропроводность толстопленочных резистивных материалов.

Толстопленочные резисторы.

Основные типы постоянных и переменных резисторов.

Физические явления, определяющие емкостные свойства конденсаторов.

Типы, параметры и конструкции конденсаторов постоянной и переменной емкости.

Физические основы работы линий задержек на поверхностных акустических волнах.

Полупроводниковые термо- и фототранзисторы, позисторы, варисторы, болометры (общее представление)

6. Физические эффекты в малоразмерных твердотельных структурах, специфические приборы наноэлектроники и методы их изготовления, основные принципы создания приборов на квантовых эффектах

Размерное квантование в гетероструктурах. Примеры структур с размерно-квантованным энергетическим спектром: квантовые ямы, квантовые нити и квантовые точки. Сверхрешетки. Туннелирование на одиночном барьере. Двухбарьерная структура. Резонансно-туннельные диод и транзистор. Эффект Джозефсона.

Транспортные явления в малоразмерных полупроводниковых структурах. Модулированное легирование. Полевые транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMT). Гетеропереходный биполярный транзистор.

Квантовый эффект Холла. Энергетический спектр носителей заряда в магнитном поле. Квантование холловского сопротивления двумерного электронного газа в магнитном поле. Дробный квантовый эффект Холла.

Одноэлектроника. Квантование кулоновской энергии в мезоскопических системах. Явление кулоновской блокады при туннелировании через переходы с малой емкостью. Одноэлектронные транзисторы и схемы на их основе.

Представления об элементной базе квантовых компьютерах - кубитах. Свойства кубита. Управление эволюцией кубита. Элементарные одно-кубитовые и двухкубитовые операции как основа квантовых вычислений. Представление о принципах квантовой связи на одиночных фотонах.

Основная литература

1. Степаненко И. П. Основы микроэлектроники. - М.: Лаборатория базовых знаний, 2004. -488 с.
2. Пасынков, В. В. Полупроводниковые приборы : учеб, пособие для вузов / В. В. Пасынков, Л. К. Чиркин. - 8-е изд., испр. - СПб. ; М. ; Краснодар : Лань, 2006. - 479 с.
3. Пасынков, В. В. Полупроводниковые приборы : учеб, пособие для студентов вузов / В. В. Пасынков, Л. К. Чиркин. - 9-е изд., стереотип. - СПб. ; М. ; Краснодар : Лань, 2009. - 479 с.
4. Щука А. А. Электроника. Учебное пособие / Под ред. Проф. А. С. Сигова. - СПб.: БХВ-Петербург, 2005. - 799 с.
5. Рамбиди Н. Г. Нанотехнологии и молекулярные компьютеры. - М.: Физматлит, 2007. - 256 с.
6. Драгунов В. П,, Неизвестный И. Г., Гридчин В. А. Основы наноэлектроники: Учеб.пособие. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. - 496 с.
7. Рамбиди, Н. Г. Структура полимеров - от молекул до наноансамблей : [учеб, пособие для студентов вузов] / Н. Г. Рамбиди. - Долгопрудный: Интеллект, 2009. - 264 с.
8. Барыбин, А. А. Электроника и микроэлектроника. Физико-технологические основы : учеб, пособие для вузов / А. А. Барыбин. - М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006. - 423 с.
9. Барыбин, А. А. Физико-химия наночастиц, наноматериалов и наноструктур / А. А. Барыбин, В. И. Томилин, Н. П. Томилина. - Красноярск : ИПК СФУ, 2011. - 243 с.
10. Томилин, В. И. Физико-химические основы технологии электронных средств : учебник длястудентов вузов / В. И. Томилин. - М. : Академия, 2010. - 410 с.
12. И. Щука А. А. Наноэлектроника. - М.: Физматкнига, 2007. - 464 с.
13. Шик А. Я., Бакуева Л. Г., Мусихин С. Ф., Рыков С. А. Физика низкоразмерных систем / под ред. А. Я. Шика. - СПб.: Наука, 2001. - 156 с.
14. Бауместер Д., Экерт А., Цайлингер А. Физика квантовой информации. -М.: Постмаркет, 2002. - 376 с.
15. Нанотехнологии в электронике / Под ред. Ю. А. Чаплыгина - М.: Техносфера, 2005. -448 с.
16. Булычев, А. Л. Электронные приборы / А. Л. Булычев, П. М. Лямин, Е. С. Ту- линов. - М. : Лайт ЛТД, 2000. - 416 с.
17. Прянишников В. А. Электроника. - С-Пб.: КОРОНА принт, 1998. - 398 с.
18. Наноматериалы. Нанотехнологии. Наносистемная техника. Мировые достижения за 2005 год / Под ред. Мальцева П. П. - М.: Техносфера, 2006. - 149 с.
19. Абрамов И. И., Новик Е. Г. Численное моделирование металлических одноэлектронных транзисторов. - Минск: БЕСТПРИНТ, 2000. - 164 с.

Дополнительная литература

1. Коледов Л.А. Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок. -М.: Лань, 2008. - 400 с.
2. Валиев, К. А. Физика субмикронной литографии : научное издание / К.А. Валиев. - М. : Наука, 1990. - 527 с.
3. Броудай И., Мерей Дж. Физические основы микротехнологии. - М.: Мир, 1985. - 494 с.
4. Шелованова, Г. Н. Физические основы микроэлектроники. Полупроводниковые гетероструктуры в микро- и наноэлектронике : учеб, пособие / Г. Н. Шелованова. - Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2005. - 175 с.
5. Шелованова, Г. Н. Современные проблемы электроники : кремниевая электроника : учеб, пособие / Г. Н. Шелованова. - Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2006. - 176 с.
6. Бубенников, А. Н. Физико-технологическое проектирование биполярных элементов кремниевых БИС : научное издание / А.Н. Бубенников, А.Д. Садовников. - М. :

Радио и связь, 1991. -287 с.
7. Соклоф С. Аналоговые интегральные схемы. - М.: Мир, 1988. - 583 с.
8. Фистуль В. И. Введение в физику полупроводников. - М.: Высш.шк., 1984.- 351 с.
9. Алексенко А.Г. Основы микросхемотехники. - М.:ЮНИМЕДИАСТАЙЛ, 2009.-448с.
10. Шалимова К. В. Физика полупроводников. - СПб.: Лань, 2010. - 400 с.
11. Моделирование полупроводниковых приборов и технологических процессов / Под ред. Д. Миллера. - М.: Радио и связь, 1989. - 280 с.
12. Базовые матричные кристаллы и матричные БИС / В.Г. Домрачев, П.П. Мальцев, И.В. Новаченко, С.Н. Пономарев. - М.: Энергоатомиздат, 1992. - 224 с.
13. Рычина Т.А., Зеленский А.В. Устройства функциональной электроники и электрорадиоэлементы. - М.: Радио и связь, 1989. - 352 с.
14. Арсенид галлия в микроэлектронике / Под ред. В.Н. Мордковича. - М.: Мир,-555 с.
15. Мухин, Ю. А. Приборы и устройства полупроводниковой оптоэлектроники: Учебное пособие по курсу "Оптоэлектроника" / 10. А. Мухин, Моск, энерг. ин-т (ТУ); Ред. В. Н. Бодров, Г. И. Обидин . - 1996 . - 298 с.
16. Электронные, квантовые приборы и микроэлектроника: Уч.пособие для вузов/ Ю.Л.Бобровский, С.А.Корнилов, И.А.Кратиров и др.; Под ред. Н.Д.Федорова. - М.: Радио и связь, 1998. - 560 с.
17. Нанотехнология: физика, процессы, диагностика, приборы / Под ред. Лучинина В. В., Таирова Ю. М. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. - 552 с.
18. Неволин В. К. Зондовые нанотехнологии в электронике. - М.: Техносфера, 2005. - 152 с.
19. Валиев К. А., Кокин А. А. Квантовые компьютеры: надежды и реальность. - М.: Изд-во Регулярная и хаотическая динамика, 2001. - 352 с.
20. Барыбин А. А., Томилин В. И., Шаповалов В. И. Физико-технологические основы макро-, микро-, и наноэлектроники. - М.: Физматлит, 2011. - 784 с.
21. Нанотехнологии в полупроводниковой электронике / Отв. редактор А. Л. Асеев. - Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. - 368 с.
22. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. - М.: Наука, 1990. - 678 с.
23. Зи С.М. Физика полупроводниковых приборов. В 2 кн. - М.: Мир, 1984. - 842 с.
24. Пожела Ю.К. Физика быстродействующих транзисторов. - Вильнюс.: Мокслас. 1988- 261 с.
25. Электронные, квантовые приборы и микроэлектроника / Под ред. Н.Д. Федорова. - М.: Радио и связь, 2002. - 560 с.
26. Викулин И.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. -М.: Радио и связь, 1990. - 232 с.
27. Тилл У., Лаксон Дж. Интегральные схемы, материалы, приборы и их изготовление. - М.: Мир, 1985. - 501 с.
28. Емельянов В.А. Быстродействующие цифровые КМОП БИС. - Минск: Полифакт, 1998. - 325 с.
29. Фотоприемники видимого и ИК диапазонов / Р. Дж. Киес, П. В. Крузе, Э. Г. Патли и др. Под ред. В.И. Стафеева. - М.: Радио и связь, 1985. - 328 с.
30. Тришенков М.А. Фотоприемные устройства и ПЗС. - М.: Радио и связь, 1992. - 400 с.

Электронные ресурсы

1. http://e.lanbook.com/books/ Горелик, С. С. Материаловедение полупроводников и диэлектриков / С. С. Горелик, М. Я. Дашевский. - М. : МИСИС, 2003. - 480 с.
2. http://e.lanbook.com/books/ Бобылев, Ю. Н. Физические основы электроники / Ю. Н. Бобылев. - М. : Горная книга, 2005. - 290 с
3. http://e.lanbook.com/books/ Наумкина, Л. Г. Электроника / Л. Г. Наумкина. - М. : Горная книга, 2007. - 331 с.
4. www.biblioclub.ru Шишкин Г. Г. Шишкин А. Г. Электроника / Г. Г. Шишкин, А. Г. Шишкин. - М. : Дрофа, 2009. - 704 с.
5. www.biblioclub.ru Кузовкин, В. А. Электроника. Электрофизические основы, микросхемотехника, приборы и устройства : Учебник / В. А.Кузовкин/ - М. : Логос, 2011 - 328 с.

Разработчики:

канд. физ.-мат. наук, заведующий базовой кафедрой физики твердого тела и нанотехнологий — П.П.Турчин

канд. физ.-мат. наук, заведующий кафедрой приборостроения и наноэлектроники — А.А.Левицкий