МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФГАОУ ВО «СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УТВЕРЖДАЮ
Директор НОЦ «Институт
непрерывного образования»
_____ Е.В. Мошкина
«___» марта 2024 г.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНАЯ ПРОГРАММА
ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ

«Цифровой дизайн устройств микроэлектроники»

Красноярск 2024

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОГРАММЫ

1.1. Аннотация программы

Программа повышения квалификации включает три модуля.

Модуль 1. Технологии проектирования и производства элементов микроэлектромеханических систем.

Модуль направлен на получение знаний и практических навыков в области современных методов и программ автоматизированного проектирования изделий и технологических процессов микроэлектромеханических систем (МЭМС). В задачи программы входит: изучение основных физических явлений, используемых в процессах функционирования МЭМС; изучение математических моделей и принципов численного моделирования МЭМС-устройств и основных технологических операций их изготовления; формирование навыков по проведению численного моделирования процессов формирования МЭМС-структур на базе современных компьютерных технологий. В результате прохождения модуля слушатель будет: применять методы разработки математических моделей элементов МЭМС; знать алгоритмы и методики проектирования МЭМС с использование систем инженерного анализа; применять специализированные программные средства при решении задач проектирования МЭМС.

Модуль 2. Схемотехническое моделирование электронных устройств.

Схемотехническое моделирование электронных устройств представляет собой один из ключевых компонентов в формировании профессиональных компетенций специалистов в области разработки и проектирования микроэлектроники. В программу модуля входят темы, посвященные изучению основных методов анализа и моделирования электронных устройств и схем, что является основой для проведения исследовательских и конструкторских работ в данной области.

В ходе обучения слушатели изучают стандартные виды моделирования, такие, как анализ статических и динамических характеристик электронных устройств, анализ устойчивости систем. Также уделяется внимание моделированию нелинейных устройств и многовариантному моделированию, которое позволяет исследовать влияние различных параметров на работу схемы и предсказывать её поведение в различных условиях. Ещё одна важная тема, включённая в модуль, — параметрическая оптимизация. Навыки и умения применять инструменты для оптимизации параметров электронных устройств являются важным элементом в проектировании высокоэффективных устройств микроэлектроники.

Модуль 3. Приборно-технологическое проектирование устройств микро- и наноэлектроники

Данный модуль предусматривает получение знаний и практических навыков в области современных методов и систем приборно-технологического проектирования полупроводниковых устройств микро- и наноэлектроники.

В задачи модуля входит: изучение основных уравнений моделей полупроводниковых приборов; изучение математических моделей

технологических процессов их изготовления; формирование навыков по проведению численного моделирования полупроводниковых структур с использованием программных средств приборно-технологического проектирования.

В результате прохождения модуля слушатель будет: знать основы построения моделей полупроводниковых приборов и технологических процессов их изготовления; применять программные средства проектирования полупроводниковых устройств микро- и наноэлектроники.

В программе повышения квалификации сделан акцент на практическом применении знаний. Слушатели познакомятся с современными инструментами и программным обеспечением, используемыми для создания и анализа схем, что позволит приобрести необходимые практические навыки для работы в сфере цифрового проектирования микроэлектронных устройств.

1.2. Цель программы

Цель программы повышения квалификации — совершенствование и получение новых компетенций, необходимых для профессиональной деятельности и повышения профессионального уровня в области цифрового дизайна устройств микроэлектроники.

1.3. Компетенции (трудовые функции) в соответствии с Профессиональным стандартом (формирование новых или совершенствование имеющихся)

В соответствии с профессиональным стандартом 29.006 «Специалист по проектированию систем в корпусе» (утвержден приказом Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 15.09.2016 № 519н), можно выделить следующие компетенции (трудовые функции), на формирование и совершенствование которых направлена программа повышения квалификации:

B/01.6 Разработка технических описаний на отдельные блоки и систему в целом.

В соответствии с профессиональным стандартом 29.007 «Специалист по проектированию микро- и наноразмерных электромеханических систем» (утвержден приказом Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 15.09.2016 № 521н), можно выделить следующие компетенции (трудовые функции), на формирование и совершенствование которых направлена программа повышения квалификации:

A/01.6 Определение возможных вариантов реализации электронных компонентов микромеханической системы.

A/03.6 Разработка первичного описания микроэлектромеханической системы на уровне принципиальной схемы.

1.4. Планируемые результаты обучения

Слушатель, освоивший программу, будет обладать профессиональными компетенциями, включающими в себя способность:

РО1. Разрабатывать математические модели базовых элементов микроэлектромеханических систем.

РО2. Разрабатывать модели приборов, схем, микроэлектромеханических устройств.

РО3. Выбирать методы и алгоритмы проектирования элементов микроэлектромеханических систем с использование систем инженерного анализа.

РО4. Применять специализированные программные средства при решении задач проектирования электронных схем и микроэлектромеханических систем.

1.5. Категория слушателей

Научно-педагогические работники СФУ, сотрудники других вузов, сотрудники сторонних организаций, студенты СФУ технических специальностей и направлений подготовки, студенты других вузов.

1.6. Требования к уровню подготовки поступающего на обучение

Среднее профессиональное или высшее образование.

К обучению по данной программе могут также допускаться технические специалисты предприятий, а также студенты магистратуры, 3–5 курсов специалитета и 3–4 курсов бакалавриата, проходящих обучение по техническим направлениям и специальностям, связанным с электронным приборостроением. Поступающие на обучение должны иметь навыки пользователя персонального компьютера.

1.7. Продолжительность обучения

Трудоемкость обучения по данной программе составляет 72 академических часа, включая самостоятельную работу слушателей.

1.8. Форма обучения: очно-заочная, с применением электронного обучения и дистанционных образовательных технологий.

1.9. Требования к материально-техническому обеспечению, необходимому для реализации дополнительной профессиональной программы повышения квалификации (требования к аудитории, компьютерному классу, программному обеспечению)

Компьютерный класс с доской и проектором. Компьютерная техника с возможностью подключения к сети Интернет.

Необходимое программное обеспечение: пакет инженерных расчетов Matlab, программная среда COMSOL Multiphysics, программный комплекс OcCAD или аналогичный, обладающий сходными возможностями схемотехнического моделирования, система автоматизированного

проектирования КОМПАС 3D (или SolidWorks), офисный пакет Microsoft Office, браузер (Chrome или др.).

1.10. Особенности (принципы) построения дополнительной профессиональной программы повышения квалификации

Особенности построения программы повышения квалификации:

− модульная структура программы;

− использование современных программных средств для выполнения инженерных и научных расчетов, систем автоматизированного проектирования;

− в поддержку программы разработан электронный курс в системе электронного обучения СФУ «е-Курсы» (https://e.sfu-kras.ru/).

1.11. Документ об образовании: удостоверение о повышении квалификации установленного образца.

УЧЕБНЫЙ ПЛАН
программы повышения квалификации
«Цифровой дизайн устройств микроэлектроники»

Форма обучения – очная.
Срок обучения – 72 часа.

№ п/п	Наименование разделов/модулей	Общая трудоемкость, ч	Всего контактн., ч	Контактные часы			СРС, ч	Формы контроля
				Лекции	Лабораторные работы	Практические и семинарские занятия		
1.	Технологии проектирования и производства элементов микроэлектромеханических систем	23	20	8	–	12	3	Зачет
2.	Схемотехническое моделирование электронных устройств	23	18	6	–	12	5	Зачет
3.	Приборно-технологическое проектирование устройств микро- и наноэлектроники	23	18	8	–	10	5	Зачет
	Итоговая аттестация	**3**	**56**	**22**		**34**	**13**	
	Итог	**72**	**72**	**24**	**–**	**36**	**18**	

УЧЕБНО-ТЕМАТИЧЕСКИЙ ПЛАН
программы повышения квалификации
«Цифровой дизайн устройств микроэлектроники»

Категория слушателей: лица, имеющие высшее образование (бакалавриат).
Срок обучения: 72 часов.
Форма обучения: очная.
Режим занятий: 4 часа в неделю.

№ п/п	Наименование и содержание разделов и тем программы	Общая трудоемкость, ч.	Всего контактн., ч.	Контактная работа:		СРС, ч.	Результаты обучения
				Лекции	Практ. и семинарские занятия		
1.	**Технологии проектирования и производства элементов микроэлектромеханических систем**	**23**	**20**	**8**	**12**	**3**	**РО1–РО4**
1.1.	Проблемы проектирования элементов МЭМС	5	4	2	2	1	РО1
1.2.	Моделирование элементов МЭМС в процессе их функционирования	10	10	4	6	–	РО2–РО4
1.3.	Моделирование элементов МЭМС в процессах их изготовления	6	4	2	2	2	РО2–РО4
	Зачет по модулю 1	2	2	–	2	–	РО1–РО4
2.	**Схемотехническое моделирование электронных устройств**	**23**	**18**	**6**	**12**	**5**	**РО2–РО4**
2.1	Стандартные виды моделирования электронных устройств	6	5	2	3	1	РО3, РО4
2.2	Моделирование нелинейных схем и устройств	6	3	1	2	1	РО2–РО4
2.3.	Многовариантные виды моделирования	5	5	2	3	1	РО3, РО4
2.4.	Параметрическая оптимизация	4	3	1	2	2	РО3, РО4
	Зачет по модулю 2	2	2	–	2	–	РО2–РО4
3.	**Приборно-технологическое проектирование устройств микро- и наноэлектроники**	**23**	**18**	**8**	**10**	**5**	**РО2, РО4**
3.1.	Основные уравнения моделей полупроводниковых приборов	3	2	2	–	1	РО2

№ п/п	Наименование и содержание разделов и тем программы	Общая трудоемкость, ч.	Всего контактн., ч.	Контактная работа:		СРС, ч.	Результаты обучения
				Лекции	Практ. и семинарские занятия		
3.2.	Модели технологических процессов	4	2	2	–	2	РО2
3.3.	Численные модели полупроводниковых структур	3	2	2	–	1	РО2
3.4.	Системы приборно-технологического проектирования	11	10	2	8	1	РО4
2.5.	*Зачет по модулю 3*	2	2	–	2	–	РО2, РО4
	Итоговый контроль	**3**				**3**	**РО1–РО4**
	ИТОГО	**72**	**56**	**22**	**34**	**16**	

II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ПРОГРАММЫ

2.1. План учебной деятельности

Результаты обучения	Учебные действия/ формы текущего контроля	Используемые ресурсы/ инструменты/технологии
Разрабатывать математические модели базовых элементов микроэлектромеханических систем	Самостоятельное изучение информационных материалов; выполнение практических заданий	Контактная работа (лекционные и практические занятия). Материалы электронного курса. Пакет Matlab. Пакет Comsol
Разрабатывать модели приборов, схем, микроэлектромеханических устройств	Самостоятельное изучение информационных материалов; выполнение практических заданий	Контактная работа (лекционные и практические занятия). Материалы электронного курса. Пакет OrCAD. Пакет Comsol
Выбирать методы и алгоритмы проектирования микроэлектромеханических систем с использование систем инженерного анализа	Самостоятельное изучение информационных материалов; выполнение практических заданий	Контактная работа (лекционные и практические занятия). Материалы электронного курса. Пакет Matlab. Пакет Comsol. Пакет OrCAD
Применять специализированные программные средства при решении задач проектирования электронных схем и микроэлектромеханических систем	Самостоятельное изучение информационных материалов; выполнение практических заданий	Контактная работа (лекционные и практические занятия). Материалы электронного курса. Пакет OrCAD. Пакет Matlab. Пакет Comsol

2.2. Виды и содержание самостоятельной работы

Самостоятельно слушателями выполняются задания по закреплению практических навыков, полученных на занятиях, изучается профильная литература. Для выполнения самостоятельной работы в рамках тем программы даются дополнительные материалы, содержащие обзор лучших практик, краткие резюмирующие материалы, дополнительные инструкции в различных форматах (видео, скринкасты, схемы, таблицы).

III. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

3.1. Учебно-методическое обеспечение, в т.ч. электронные ресурсы в корпоративной сети СФУ и сети Интернет

К модулю 1

1. Распопов, В.Я. Микромеханические приборы: учеб. пособие / В.Я. Распопов. – М.: Машиностроение, 2007. – 400 с.

2. Микросистемные датчики физических величин / В.Д. Вавилов, С.П. Тимошенков, А.С. Тимошенков. – М.: Техносфера, 2018. – 549 с.

3. Бидерман, В.Л. Теория механических колебаний: учебник для вузов. – М.: Высш. школа, 1980. – 408 с.

4. Аш Ж. и др. Датчики измерительных систем: пер. с франц. / под ред. А.С. Обухова. – М.: Мир, 1992. Кн. 1. – 480 с.

5. Родионов, Ю.А. Химические технологии в производстве микроэлектромеханических систем / Ю.А. Родионов. – 3-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2023. – 220 с.

6. Королёв, М.А. Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем [Электронный ресурс]: в 2 ч. Ч. 1 / М.А. Королёв, Т.Ю. Крупкина, М.А. Ревелева; М.А. Королёв [и др.]; под общей ред. чл.-корр. РАН проф. Ю.А. Чаплыгина. – 2-е изд. (эл.). – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. – 397 с.

К модулю 2

1. Компьютерное моделирование и проектирование радиоэлектронных средств. Учебник для вузов / А. Головков, И. Пивоваров, И. Кузнецов. – СПб.: Питер, 2015. – 208 с.

2. Электротехника и электроника: учебное пособие / А.Ф. Синяговский, В.П. Довгун, В.В. Новиков, И.Г. Важенина; Сибирский федеральный университет, Институт космических и информационных технологий. – Красноярск: СФУ, 2021. – 492 с.

3. Основы автоматизированного проектирования: учебник / под ред. А.П. Карпенко. – М.: ИНФРА-М, 2021. – 329 с.

4. Автоматизация схемотехнического проектирования: учеб. пособие для вузов / В.Н. Ильин, В.Т. Фролкин и др.; под ред. В.Н. Ильина. – М.: Радио и связь, 1987. – 386 с. / под ред. А.П. Карпенко. – М.: ИНФРА-М, 2021. – 329 с.

5. Методические указания к лабораторной работе «Схемотехническое моделирование» / Авт.-сост. И.М. Шевкун. – Мн.: БГУ 2000. – 26 с.

6. Кобрин, Ю.П. Оптимизация при проектировании РЭС: метод. указания к лабораторной работе / Ю.П. Кобрин. – Томск: ТУСУР, 2018. – 36 с.

К модулю 3

1. Королев, М.А. Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем: учеб. пособие для студентов вузов, обуч. по направлению 210100 «Электроника и микроэлектроника»: в 2 ч. / ред.

Ю.А. Чаплыгин. Ч. 1: Технологические процессы изготовления кремниевых интегральных схем и их моделирование / М.А. Королев, Т.Ю. Крупкина, М.А. Ревелева. – М.: Бином. Лаб. знаний, 2010. – 397 с.

2. Королев, М.А. Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем: учеб. пособие для студентов вузов, обуч. по направлению 210100 «Электроника и микроэлектроника»: в 2 ч. / ред. Ю.А. Чаплыгин. Ч. 2: Элементы и маршруты изготовления кремниевых ИС и методы их математического моделирования / М.А. Королев, Т.Ю. Крупкина, М.Г. Путря, В.И. Шевяков. – М.: Бином. Лаб. знаний, 2010. – 422 с.

3. Левицкий, А.А. Приборно-технологическое моделирование устройств микро- и наноэлектроники. Математические модели и программные средства: учебное пособие / А.А. Левицкий, П.С. Маринушкин, С.И. Трегубов. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2020. – 68 с.

4. 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.

5. Зи, С. Физика полупроводниковых приборов: в 2 кн.; пер. с англ. / С. Зи. – М.: Мир. Т. 1, 1984. – 455 с.

6. Зи, С. Физика полупроводниковых приборов: в 2 кн.; пер. с англ. / С. Зи. – М.: Мир. Т. 2, 1984. – 455 с.

7. Шалимова, К.В. Физика полупроводников [Текст]: учебник / К.В. Шалимова. – 4-е изд., стер. – СПб.; М.; Краснодар: Лань, 2010. – 391 с.

3.2. Программное обеспечение (информационные обучающие системы, системы вебинаров, сетевые ресурсы хостинга видео, изображений, файлов, презентаций и др.)

1. Сайт компании разработчика пакета COMSOL Multiphysics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.comsol.ru

IV. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ОСВОЕНИЯ ПРОГРАММЫ

4.1. Формы аттестации, оценочные материалы, методические материалы

Программа предусматривает проведение текущей и итоговой аттестации. Текущий контроль успеваемости проводится в форме устного опроса и на основе оценки качества выполнения самостоятельных и практических заданий.

Реализация программ повышения квалификации завершается итоговой аттестацией, которая проводится в форме зачета.

Примерные вопросы для оценки качества выполнения самостоятельных и практических заданий

По модулю «Технологии проектирования и производства элементов микроэлектромеханических систем»

1. Принципиальные схемы чувствительных элементов осевых микроакселерометров.
2. Принципиальные схемы чувствительных элементов маятниковых микроакселерометров.
3. Уравнения движения осевого и маятникового акселерометров
4. Формирование информации об измеряемом ускорении.
5. Особенности конструкций осевых и маятниковых микроакселерометров.

По модулю «Схемотехническое моделирование электронных устройств»

1. Какие причины отклонения параметров элементов от номинальных?
2. На что влияют отклонения параметров элементов?
3. Что называется допусковым анализом?
4. Что называется допусковым синтезом?
5. Что такое чувствительность?

По модулю «Приборно-технологическое проектирование устройств микро- и наноэлектроники»

1. Приведите основные уравнения, описывающие стационарные распределения электрического поля и концентрации носителей заряда в одномерной модели однородной полупроводниковой структуры.
2. Приведите уравнение полного тока в полупроводнике.
3. Приведите уравнение, позволяющее рассчитать стационарное распределение электрического поля в одномерной модели однородной полупроводниковой структуры по явной схеме.
4. Приведите соотношения, используемые для конечно-разностной аппроксимации производных в дифференциальных уравнениях, описывающих распределение электрического поля в полупроводнике.
5. Приведите порядок построения конечно-разностной аппроксимации уравнение для расчета стационарного распределения электрического поля по явной схеме.

4.2. Требования и содержание итоговой аттестации

Основанием для аттестации является получение оценки «зачтено» по каждому модулю программы и защита письменной работы.

Итоговая аттестация проходит в форме защиты письменной работы по выбранным темам программы повышения квалификации, изученным в ходе обучения. Темы выбираются обучающимся и согласовываются с преподавателем.

В письменную работу должны быть включены практические задания по выбранным темам, выполненные в ходе обучения или предложенные обучающимся: описание теоретических аспектов представленных заданий, формулировка целей и задач, методология выполнения заданий и обсуждение результатов. Рекомендуемый объём письменной работы 10–15 страниц. По результатам защиты работы обучающемуся выставляется оценка по системе «зачтено – не зачтено».

Оценка «зачтено» выставляется обучающемуся, если письменная работа оформлена в соответствии со требованиями к оформлению документов учебной деятельности и содержит все необходимые элементы, в устных ответах обучающегося верно изложено не менее 50 % материала и не допущено существенных неточностей; оценка «не зачтено» выставляется обучающемуся, не знающему значительной части (более 50 %) программного материала и допустившему существенные ошибки.

Примеры тем и содержания для итоговой аттестационной работы

По модулю «Технологии проектирования и производства элементов микроэлектромеханических систем»

Расчет собственных частот и форм колебаний МЭМС-акселерометра:

1. Обзор подходов и программных средств моделирования. Цели и задачи работы.

2. Пример моделирования МЭМС-акселерометра.

2.1. Описание методики импортирования (создания) модели.

2.2. Описание процедуры численного моделирования.

2.3. Результаты моделирования.

2.4. Обсуждение полученных данных, выводы.

По модулю «Схемотехническое моделирование электронных устройств»

Многовариантные виды анализа в задачах схемотехнического моделирования:

1. Обзор методов. Цели и задачи многовариантных исследований электронных устройств.

2. Пример исследования электронного устройства методом Монте-Карло.

2.1. Описание метода исследование. Алгоритм.

2.2. Постановка цели и определение задач исследования.

2.3. Краткое описание процедуры проведения исследования в конкретном программном средстве.

2.4. Результаты исследования и интерпретация полученных данных.

По модулю «Приборно-технологическое проектирование устройств микро- и наноэлектроники»

Моделирования диодной структуры с *p*-*n*-переходом в модуле Semiconductor системы COMSOL Multiphysics:

1. Обзор подходов и программных средств моделирования. Цели и задачи работы.

2. Пример исследования диодной структуры с *p*-*n*-переходом.

2.1. Описание методики создания модели.

2.2. Описание процедуры численного моделирования.

2.3. Результаты моделирования.

2.4. Обсуждение полученных данных, выводы.

Программу составили:

Канд. техн. наук, доцент кафедры приборостроения
и наноэлектроники Института инженерной физики
и радиоэлектроники СФУ Ф.Г. Зограф

Канд. физ-мат. наук, доцент,
зав. кафедрой приборостроения и наноэлектроники
Института инженерной физики
и радиоэлектроники СФУ А.А. Левицкий

Канд. техн. наук, доцент, кафедры приборостроения
и наноэлектроники Института инженерной физики
и радиоэлектроники СФУ П.С. Маринушкин

Руководитель программы:

Канд. физ-мат. наук, доцент,
зав. кафедрой приборостроения и наноэлектроники
Института инженерной физики
и радиоэлектроники СФУ А.А. Левицкий