

**БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по учебной работе и  
образовательным инновациям

\_\_\_\_\_ О.Г. Прохоренко

«08» июля 2022 г.

Регистрационный № УД – 11699/уч.

**ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛЕКТРОНИКИ**

Учебная программа учреждения высшего образования  
по учебной дисциплине для специальности:

**1 - 31 03 01**

**Математика (по направлениям)**

Направление специальности:

**1 - 31 03 01 - 04**

**Математика (научно-конструкторская деятельность)**

2022 г.

Учебная программа составлена на основе ОСВО 1-31 03 01-2021, типового учебного плана № G31-1-011/пр-тип. от 31.03.2021 и учебного плана № G31-1-018/уч. от 25.05.2021.

**СОСТАВИТЕЛИ:**

С.Е. Бухтояров, доцент кафедры математической кибернетики Белорусского государственного университета, кандидат физико-математических наук, доцент.

А.И. Ковалев, доцент кафедры физики полупроводников и наноэлектроники Белорусского государственного университета, кандидат физико-математических наук

**РЕЦЕНЗЕНТ:**

М.И. Вашкевич, доцент кафедры электронных вычислительных средств Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, доктор технических наук, доцент.

**РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:**

Кафедрой математической кибернетики Белорусского государственного университета  
(протокол № 10 от 25.05.2022);

Научно-методическим советом Белорусского государственного университета  
(протокол № 6 от 29.06.2022)

Заведующий кафедрой  
математической кибернетики \_\_\_\_\_ А. Л. Гладков

## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Начало XXI века характеризуется бурным развитием информационных технологий, базирующихся на устройствах, обязательно включающих в себя интегральные схемы (ИС), предназначенные, как для системного применения, например, анализаторы речи, микропроцессоры, контроллеры, запоминающие устройства и могущие удовлетворить требованиям по обработке большого объема данных, так и для всевозможного прикладного применения. В настоящее время трудно найти промышленные товары, не содержащие подобных устройств, а объем продаж изделий электронной промышленности превышает объем продаж изделий автомобильной, химической и сталелитейной промышленности, причем значительную долю составляют сверхбольшие интегральные схемы (СБИС). Это стало возможным благодаря прогрессу в технологии изготовления ИС, базирующейся на уникальных методах формирования микрорисунка, нанесения проводящих и непроводящих покрытий, создания легированных неоднородностей в полупроводнике, разработанных за последние 30 лет и основанных на последних достижениях фундаментальных и прикладных наук. И сейчас область технологии изготовления ИС находится в состоянии интенсивного развития. Разумеется, она требует подготовленных специалистов, представляющих уже достигнутый уровень развития и способных совершенствовать технологию. Кроме того, заметим, что и процесс проектирования ИС невозможен без представления разработчиком типовой структуры микросхемы, знания параметров элементной базы и состава самой элементной базы конкретной микросхемы. Необходимо представлять, как параметры элементной базы связаны со способом изготовления типовой структуры, чем определяются те или иные ограничения при проектировании, как проводить анализ полученных результатов, и, наконец, какие специфические факторы влияют на стоимость произведенной продукции.

Дисциплина «Технология электроники» дает представление обо всех основных этапах (процессах) формирования ИС на полупроводниковых пластинах, а также дает физико-химические основы и формальные математические модели, описывающие процессы изготовления ИС. Получаемые соотношения между параметрами вольт-амперных характеристик элементной базы, её геометрическими характеристиками и режимами изготовления дают возможность описания технологического процесса и правил проектирования топологического рисунка.

### **Цели и задачи учебной дисциплины**

*Целью* дисциплины является систематическое изучение физико-химических и технологических основ и формальных математических моделей процесса изготовления ИС.

**Развивающей целью** учебной дисциплины является формирование у студентов фундаментальных представлений о маршруте изготовления и проектирования ИС.

**Воспитательной целью** учебной дисциплины является формирование у студентов математической и технической культуры, а также стремления к получению знаний в области электроники и схемотехники.

**Основными задачами**, решаемыми в рамках изучения дисциплины «Технология электроники», являются изучение физико-химических и технологических основ и формальных математических моделей процесса изготовления ИС.

**Место учебной дисциплины** в системе подготовки специалиста с высшим образованием: учебная дисциплина относится к модулю «Математическая электроника» компонента учреждения высшего образования.

**Связи с другими учебными дисциплинами.**

Изложение дисциплины базируется на знаниях, полученных студентами при изучении таких дисциплин как «Введение в специальность», «Дискретная математика и теория графов», «Физические основы электроники». В свою очередь знания, полученные при ее изучении, являются основой для последующего изучения дисциплин «Основы математической электроники», «Схемотехника», «Системотехника аппаратно-программных систем», а также ряда специальных дисциплин.

#### **Требования к компетенциям**

Освоение учебной дисциплины «Технология электроники» должно обеспечить формирование следующих универсальных, базовых профессиональных и специализированных компетенций.

**универсальные** компетенции:

- УК-1. Владеть основами исследовательской деятельности, осуществлять поиск, анализ и синтез информации;
- УК-4. Работать в команде, толерантно воспринимать социальные, этнические, конфессиональные, культурные и иные различия;
- УК-5. Быть способным к саморазвитию и совершенствованию в профессиональной деятельности;
- УК-6. Проявлять инициативу и адаптироваться к изменениям в профессиональной деятельности;

**базовые профессиональные** компетенции:

- БПК-4. Применять теоретические знания и навыки в самостоятельной исследовательской деятельности;

**специализированные** компетенции:

- СК-8. Применять при проектировании аппаратно-программных систем знания об их электрических и схемотехнических особенностях функционирования.

В результате изучения дисциплины студент должен:

**знать:**

- тенденции развития технологии микроэлектроники;
- структуру элементов (биполярных и МОП транзисторов) в разрезе и в виде рисунков топологических слоёв сверху;
- маршрут изготовления ИС;

**уметь:**

- рассчитывать профиль распределения примеси и толщину растущего окисла в зависимости от температуры и времени процесса.
- проектировать топологический чертеж базовых логических элементов;

**владеть:**

- навыками работы в специализированных программах проектирования электрических схем.

### **Структура учебной дисциплины**

Дисциплина «Технология электроники» изучается в 3 семестре очной формы получения высшего образования по специальности 1-31 03 01 Математика (по направлениям), направление специальности 1-31 03 01-04 Математика (научно-конструкторская деятельность).

Всего на изучение учебной дисциплины отведено 108 часов, в том числе 72 аудиторных часа, из них: лекции – 36 часов, практические занятия – 30 часов, управляемая самостоятельная работа – 6 часов.

Трудоемкость учебной дисциплины составляет 3 зачетные единицы.

Форма текущей аттестации – **зачет и экзамен.**

# СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

## Раздел 1. Введение.

**Тема 1.1** Этапы развития электронной промышленности. (Закон Мура. Основные определения. Требования, предъявляемые к интегральной схеме. Получение кремния. Подготовка исходных пластин. Представление о маршруте изготовления ИС).

## Раздел 2. Основные технологические этапы изготовления ИС.

**Тема 2.1** Химическая очистка пластин (Основная задача химической очистки. Основные этапы химической очистки. Удаление органических загрязнений. Удаление неорганических загрязнений. Промывка в деионизованной воде).

**Тема 2.2** Термическое окисление кремния (Характеристики окисла. Заряд в окисле. Перераспределение легирующей примеси на границе раздела фаз. Дефекты окисления).

**Тема 2.3** Диффузия (Способы диффузии. Механизмы диффузии. Особенности диффузии при высокой концентрации примеси. Влияние электрического поля. Особенности диффузии основных легирующих примесей. Особенности диффузии в поликремнии. Контроль параметров диффузионных структур. Дефектность процесса диффузии).

**Тема 2.4** Ионная имплантация (Оборудование для ионного легирования. Физические основы метода. распределение внедрённых ионов. Каналирование. Образование радиационных нарушений. Отжиг радиационных дефектов. Активация примесных атомов. Диффузия имплантированных примесей).

**Тема 2.5** Фотолитография (Этапы получения микрорисунка. Виды резистов и их характеристики. Особенности позитивного резиста. Технология литографии. Проколы в фоторезисте. Особенности проекционной печати. Практические зависимости фотолитографии. Правила наложения слоёв. Дефектность литографии. Перспективы развития литографии).

**Тема 2.6** Травление (Мокрое и сухое (ионно-плазменное) травление. Характеристики травления. Дефектность процесса ионного травления).

**Тема 2.7** Нанесение покрытий (Нанесение поликристаллического кремния. Нанесение нитрида кремния. Особенности механизма образования металлических плёнок. Методы осаждения Al и его сплавов).

**Тема 2.8** Эпитаксия (Эпитаксия из газовой фазы. Особенности распределения легирующей примеси в растущей плёнке. Дефекты эпитаксии. Виды эпитаксии).

## Раздел 3. Основы физики полупроводниковых приборов.

**Тема 3.1** рп-переход (Зонная диаграмма рп-перехода. Прямое и обратное смещение рп-перехода. Вольт-амперная характеристика рп-перехода. Процессы, протекающие в рп-переходе, термодинамическое равновесие.)

**Тема 3.2** Биполярный транзистор (Типы биполярных транзисторов (npn и pnp) и их зонные диаграммы. Процессы, протекающие в биполярных транзисторах, режимы работы. Схемы включения биполярных транзисторов. Основные характеристики биполярных транзисторов.)

**Тема 3.3** Полевые транзисторы (Типы полевых транзисторов (n-канальный, p-канальный, с встроенным каналом, с инжектированным каналом. Процессы, протекающие в полевых транзисторах. Основные характеристики полевых транзисторов).

**Тема 3.4** Топологическая реализация полевых транзисторов в программном пакете Microwind. Моделирование их характеристик.

**Тема 3.5** Топологическая реализация базовых логических элементов в программном пакете Microwind (Инвертор, проходной ключ, ИЛИ-НЕ, И-НЕ).

## УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Дневная форма получения образования с применением электронных средств обучения (ДО)

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов					Литература	Формы контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия	Количество часов УСП		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>1</b>	<b>Введение.</b>	<b>2</b>						
1.1	Этапы развития электронной промышленности.	2					[1]	Устный опрос
<b>2</b>	<b>Основные технологические этапы изготовления ИС.</b>	<b>16</b>	<b>6</b>					
2.1	Химическая очистка пластин	2					[1,2]	Устный опрос
2.2	Термическое окисление кремния	2	2				[1,2]	Устный опрос
2.3	Диффузия	2	2			2	[1,2]	Защита практической работы
2.4	Ионная имплантация	2	2			2	[1,2]	Устный опрос
2.5	Фотолитография	2					[1,2]	Экспресс-опрос
2.6	Травление	2					[1,2]	Экспресс-опрос
2.7	Нанесение покрытий	2					[1,2]	Устный опрос
2.8	Эпитаксия	2				2	[1,2]	Устный опрос
<b>3</b>	<b>Основы физики полупроводниковых приборов.</b>	<b>18</b>	<b>24</b>					
3.1	pn-переход	2	4				[3,4]	Защита практической работы
3.2	Биполярный транзистор	4	4				[3,4]	Защита практической работы



3.3	Полевые транзисторы	4	4				[3,4]	Защита практической работы
3.4	Топологическая реализация полевых транзисторов в программном пакете Microwind. Моделирование их характеристик.	4	6				[3,4]	Защита практической работы
3.5	Топологическая реализация базовых логических элементов в программном пакете Microwind (инвертор, проходной ключ, ИЛИ-НЕ, И-НЕ).	4	6				[3,4]	Защита практической работы
	<b>ИТОГО</b>	<b>36</b>	<b>30</b>			<b>6</b>		

## ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### Перечень основной литературы

1. Лозовский, В. Н. Нанотехнологии в электронике. Введение в специальность : [учебное пособие] / В. Н. Лозовский, С. В. Лозовский. - Санкт-Петербург ; Москва ; Краснодар : Лань, 2018. - 331 с.
2. Щука, А. А. Нанoeлектроника : учебник для вузов, для студентов обучающихся по инженерно-техническим направлениям / А. А. Щука ; под общ. ред. А. С. Сигова. - Москва : Юрайт, 2022. - 297 с.
3. Воротынцев, В. М. Базовые технологии микро- и нанoeлектроники : учеб. пособие для студ. спец. 11.04.04 "Электроника и нанoeлектроника" / В. М. Воротынцев, В. Д. Скупов. - Москва : Проспект, 2018.
4. Родионов, Ю. А. Технологические процессы в микро- и нанoeлектронике : учебное пособие / Ю. А. Родионов. - Москва ; Волгоград : Инфра-Инженерия, 2019. - 350с.

### Перечень дополнительной литературы

5. Технология сверхбольших интегральных схем и оптико-механическое оборудование для микро- и нанoeлектроники / В. В. Мартынов, Я. И. Точицкий ; НАН Беларуси. - Минск : Беларуская навука, 2018. - 467 с.
6. Инновационные технологии и оборудование субмикронной электроники / [авт.: А. П. Достанко и др.] ; под общ. ред. А. П. Достанко ; НАН Беларуси, Бел. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. - Минск : Беларуская навука, 2020. - 260 с.
7. Нанотехнологии в электронике – 3.1 / под ред. Ю. А. Чаплыгина. - Москва : Техносфера, 2016. - 479 с.
8. Пул Ч., Оуэне Ф. Нанотехнологии. – М: Техносфера, 2004. –328 с.
9. Нанотехнология в полупроводниковой электронике /Отв. ред. А.Л. Асеев.– Новосибирск: Изд. СО РАН, 2004.–368 с.
10. Нанотехнологии в электронике/ Под. ред Ю.А.Чаплыгина. -М.: Техносфера, 2005. –348 с.
11. Драгунов, В.П. Основы нанoeлектроники / В.П. Драгунов, И.Г. Неизвестный, В.А. Гридчин. – Новосибирск: НГТУ, 2000. – 322 с.
12. Материалы современной электроники: [учеб. пособие] / В. Ф. Марков, Х. Н. Мухамедзянов, Л. Н. Маскаева; [под общ.ред. В. Ф. Маркова]; М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал, федер. ун-т. - Екатеринбург: Изд-во Урал, ун-та, 2014. - 272 с.

## **Перечень рекомендуемых средств диагностики и методика формирования итоговой отметки**

С целью текущего контроля знаний студентов предусматривается проведение устных опросов, экспресс-опросов и защиты практических работ.

Формой текущей аттестации по дисциплине «Технология электроники» учебным планом предусмотрен **зачет и экзамен.**

### **Итоговая отметка формируется на основе:**

1. Правила проведения аттестации студентов, курсантов, слушателей при освоении содержания образовательных программ высшего образования (Постановление Министерства образования Республики Беларусь № 53 от 29.05.2012 г.).

2. Положения о рейтинговой системе оценки знаний обучающихся по учебной дисциплине в БГУ (Приказ ректора БГУ от 31.03.2020 № 189-ОД).

3. Критериев оценки результатов учебной деятельности обучающихся в учреждениях высшего образования по десятибалльной шкале (Письмо Министерства образования Республики Беларусь от 28.05.2013 г. № 09-10/53-ПО).

При формировании итоговой отметки используется рейтинговая система оценки знаний студента, дающая возможность проследить и оценить динамику процесса достижения целей обучения. Рейтинговая система предусматривает использование весовых коэффициентов для текущего контроля знаний и текущей аттестации студентов по дисциплине.

Рекомендуемые весовые коэффициенты, определяющие вклад текущего контроля знаний в итоговую отметку:

- устный и экспресс-опросы – 20 %;
- защита практических работ – 80 %;

Итоговая отметка по дисциплине рассчитывается на основе отметки текущей успеваемости (рейтинговой системы оценки знаний) и экзаменационной отметки с учетом их весовых коэффициентов. Рекомендуемый вес отметки по текущей успеваемости составляет 30 %, экзаменационной отметки – 70 %.

## **Примерный перечень заданий для управляемой самостоятельной работы студентов**

### **Раздел 2. Основные технологические этапы изготовления ИС.**

#### **Тема 2.3. Диффузия (2 ч.)**

Задание. Проведите расчет профиля легирующей примеси.

**Форма контроля** – защита практической работы.

#### **Тема 2.4. Ионная имплантация (2 ч.)**

Задание. Перечислите основные материалы для ионной имплантации в технологиях на основе кремния и на основе других полупроводников.

**Форма контроля** – устный опрос.

#### **Тема 2.8. Эпитаксия (2 ч.)**

Задание. Перечислите основные материалы для эпитаксии в технологиях на основе кремния и на основе других полупроводников.

**Форма контроля** – устный опрос.

### **Примерная тематика практических работ**

1. Расчет профиля легирующей примеси
2. Вольт-амперных характеристики рп-перехода для различных технологических параметров
3. Вольт-амперных характеристики биполярного транзистора
4. Вольт-амперных характеристики полевого транзистора
5. Топологическая реализация МОП транзисторов в программном пакете Microwind. Моделирование их характеристик.
6. Топологическая реализация базовых логических элементов в программном пакете Microwind (инвертор, проходной ключ, ИЛИ-НЕ, И-НЕ).

### **Описание инновационных подходов и методов к преподаванию учебной дисциплины**

При организации образовательного процесса используется *эвристический подход*, который предполагает:

- осуществление студентами личностно-значимых открытий окружающего мира;
- демонстрацию многообразия решений большинства профессиональных задач и жизненных проблем;
- творческую самореализацию обучающихся в процессе создания образовательных продуктов;
- индивидуализацию обучения через возможность самостоятельно ставить цели, осуществлять рефлексию собственной образовательной деятельности.

Наиболее эффективной предполагается следующая форма реализации эвристического подхода: решение сложных задач разбиваются на этапы, после чего обучаемые подводятся к самостоятельному определению действий на этапах.

При организации образовательного процесса используется также *практико-ориентированный подход*, который предполагает:

- освоение содержания образования через решение практических задач;

- приобретение навыков эффективного выполнения разных видов профессиональной деятельности;
- ориентацию на генерирование идей, реализацию групповых студенческих проектов, развитие предпринимательской культуры;
- использованию процедур, способов оценивания, фиксирующих сформированность профессиональных компетенций.

### **Методические рекомендации по организации самостоятельной работы обучающихся**

При изучении учебной дисциплины рекомендуется использовать следующие формы самостоятельной работы:

- поиск (подбор) и обзор литературы и электронных источников по индивидуально заданной теме дисциплины;
- выполнение домашнего задания;
- проведение научно-исследовательских работ для выполнения практических заданий;
- подготовка к участию в научных и научно-практических конференциях и конкурсах.

### **Примерный перечень вопросов к экзамену**

1. Что такое ИС.
2. Что такое планарная технология.
3. Каковы важные преимущества Si перед Ge или GaAs, с точки зрения производства и использования ИС.
4. Как получают чистый «электронный» кремний.
5. Что такое маршрут изготовления ИС.
6. Что необходимо хорошо представлять, чтобы формировать маршрут изготовления ИС.
7. Каковы основные источники загрязнений.
8. Как подразделяются адсорбционные слои.
9. В чем основная задача хим. очистки.
10. Каковы основные этапы хим. Очистки.
11. Что такое деионизованная вода.
12. В чем удаляют органические загрязнения. Каковы самые сильные окислители.
13. В чем проводят десорбционную очистку. Каковы самые сильные окислители.
14. Какую роль при окислении играют вакансии в кремнии.
15. Какие основные характеристики окисла контролируются в процессе изготовления.
16. Какова классификация зарядов в окисле.

17. Каким образом уменьшают подвижный заряд в окисле.
18. Каковы основные способы диффузии.
19. Каковы основные механизмы перемещения атомов в решетке твердого тела.
20. Какой механизм диффузии называют вакансионным.
21. Как связана скорость перемещения атома с концентрацией вакансий.
22. Какова зависимость коэффициента диффузии от температуры.
23. Какими примесями легируют кремний для создания областей проводимости p- и n- типа.
24. Какими особенностями характеризуется процесс диффузии в поликремнии.
25. Какие основные параметры пластин контролируются после проведения диффузии.
26. Каковы преимущества имплантации при легировании полупроводника.
27. Каким образом определяется доза облучения.
28. Чем определяется энергия иона.
29. Какие различают виды энергетических потерь иона при взаимодействии его с твердым телом.
30. Какое название получила теория пробега ионов в аморфной и кристаллической мишени.
31. Что обозначает значки " $R_p$ ", " $\Delta R_p$ "
32. Какова причина появления рассеяния ионов.
33. Каковы свойства «Гауссовой» функции распределения, описывающей профиль внедренных ионов.
34. При какой энергии падающего иона возникают дефекты структуры.
35. Привести пример простых дефектов.
36. Какое число атомов решетки кремния необходимо сместить из положения равновесия, чтобы монокремний стал аморфным. Каким образом обнаружить «аморфность» кремния.
37. К каким эффектам в p-n переходе приводит наличие неотожженных дефектов в кремнии.
38. Каковы особенности активации примеси при малых, средних и больших дозах имплантации. О каких дозах имплантации идет речь, если в качестве критерия выбрать дозу аморфизации?
39. Сколько основных этапов в получении рисунка.
40. Что такое МПО, шаблон.
41. Какие бывают типы фоторезистов.
42. К какой области спектра чувствительны фоторезисты.
43. Что представляет собой проявитель позитивного резиста.
44. Каковы основные группы операций литографии.
45. Зачем делается метка на пластине и фотошаблоне.
46. Зачем проводится задубливание фоторезиста.
47. В чем снимают фоторезист.
48. Что представляет собой дефект в фоторезисте.
49. Почему дефектность проекционной печати меньше, чем контактной

50. Что такое системы с дифракционным ограничением.
51. Чем определяется разрешающая способность и глубина резкости объектива.
52. Что такое разрешающая способность объектива.
53. Каковы виды травления.
54. Как отличается по своим характеристикам мокрое от сухого травления
55. Что такое селективность и анизотропность травления.
56. Зачем необходимо плазма при травлении.
57. Что такое загрузочный эффект.
58. Каков общий механизм осаждения диэлектрических пленок.
59. Какой тип энергии для этого используется.
60. Для чего используется поликристаллический кремний (ПКК) в микросхемах.
61. Что представляет собой уже выращенная пленка ПКК.
62. Каким образом изменяется размер зерен пленки при увеличении температуры осаждения, какова примерно его величина.
63. Как изменяется сопротивление пленки ПКК при увеличении зерна.
64. Для чего используется стехиометрический нитрид кремния при изготовлении ИС.
65. Что происходит с пластиной кремния, на которую осаждают пленку  $\text{Si}_3\text{N}_4$  стехиометрического состава.
66. С какой целью используются легированные фосфором пленки  $\text{SiO}_2$ .
67. Какое стекло имеет значительно более низкую температуру оплавки, чем ФСС при меньшем содержании фосфора в пленке.
68. Какова основная причина появления пылевидных включений в осаждаемую пленку  $\text{SiO}_2$ .
69. Какие качественные требования предъявляются к металлизации.
70. Чем достигается хорошая адгезия Al к  $\text{SiO}_2$ .
71. Каков механизм образования омического контакта Me – полупроводник.
72. Какие существуют виды напыления.
73. Каковы недостатки метода напыления с использованием резистивного нагрева.
74. Каковы недостатки метода напыления с использованием электронно-лучевого испарения.
75. Каковы достоинства метода магнетронного распыления.
76. С какой целью проводят операцию «вжигание алюминия».
77. Что представляет собой электромиграция, к какому виду дефекта она приводит.
78. Для чего необходима планаризация поверхности при формировании металлической разводки.
79. Что означает термин «эпитаксия».
80. С какой целью делают эпитаксию.
81. Какие материалы используют для эпитаксии.

82. Как зависит скорость роста эпитаксиальной пленки от температуры процесса.
83. Каким практическим путем добиваются роста монокристалла.
84. Какова природа автолегирования.
85. Каковы стадии процесса эпитаксии.
86. Каковы известные промышленные методы эпитаксии.
87. Создание в кремнии областей р- и n-типа проводимостей. Зонные диаграммы.
88. Физика работы pn-перехода. Прямое и обратное смещение.
89. Структура и физические основы работы биполярного pnp-транзистора.
90. Структура и физические основы работы биполярного npn-транзистора.
91. Структура и физические основы работы n-канального МОП транзистора.
92. Структура и физические основы работы p-канального МОП транзистора.
93. Схемотехническая и топологическая реализация КМОП-инвертора.
94. Схемотехническая и топологическая реализация КМОП проходного ключа.
95. Схемотехническая и топологическая реализация логического элемента И-НЕ.
96. Схемотехническая и топологическая реализация логического элемента ИЛИ-НЕ.



## ПРОТОКОЛ СОГЛАСОВАНИЯ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ УВО

Название учебной дисциплины, с которой требуется согласование	Название кафедры	Предложения об изменениях в содержании учебной программы учреждения высшего образования по учебной дисциплине	Решение, принятое кафедрой, разработавшей учебную программу (с указанием даты и номера протокола)
Основы математической электроники	Кафедра математической кибернетики	Нет	Оставить учебную программу без изменений (протокол № 10 от 25.05.2022).

**ДОПОЛНЕНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ К УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЕ**  
на \_\_\_\_/\_\_\_\_ учебный год

№№ п/п	Дополнения и изменения	Основание

Учебная программа пересмотрена и одобрена на заседании кафедры математической кибернетики (протокол № \_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.)

Заведующий кафедрой  
доктор физ.-мат. наук, профессор

А.Л. Гладков

УТВЕРЖДАЮ  
Декан факультета  
доктор физ.-мат. наук, доцент

С.М. Босяков