МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Факультет *информационных технологий и электроники*
наименование факультета

Кафедра *Нано – и микроэлектроника*
наименование кафедры

Направление подготовки *11.03.04. «Электроника и наноэлектроника»*
код и наименование

Профиль *Микроэлектроника и твердотельная электроника*
наименование

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА
ПГУ 02. 11.03.04.010 ПЗ
обозначение, присваиваемое кафедрой

на тему:
Конструирование и расчет параметров интегральных конденсаторов
тема бакалаврской работы

Студент группы *21ПД1* номер группы — подпись, дата 09.06.25 — *М.А. Мурашов* иниц., фамилия

Руководитель *доцент НиМЭ* должность — подпись, дата 09.06.25 — *Ю.В. Аношкин* иниц., фамилия

ПГУ, каф. НимЭ наименование организации

Нормоконтролер *ст. преподаватель* должность — подпись, дата 19.06.25г. — *Т.Н. Рыжова* иниц., фамилия

Работа допущена к защите в ГЭК (протокол заседания кафедры от 09.06.25 № 10)

Заведующий кафедрой подпись, дата 09.06.25г. — *И.А. Пронин* инициалы, фамилия

Работа защищена с оценкой *удовл.* (протокол ГЭК от 20.06 № 14)

Секретарь ГЭК подпись, дата 20.06.25г. — *А.А. Вольсков* инициалы, фамилия

РЕФЕРАТ

Пояснительная записка содержит 88 страниц, включает 3 рисунка, 6 таблиц, 7 формулы, список использованных источников из 24 наименований.

Ключевые слова: интегральные конденсаторы, микроэлектроника, паразитная емкость, тонкие пленки, полупроводники.

Цель: Исследование интегральных конденсаторов и их роли в современной микроэлектронике, а также анализ методов оптимизации их характеристик и минимизации нежелательных эффектов.

Задачи:

1. Провести обзор существующих типов и конструкций интегральных конденсаторов, применяемых в микроэлектронике.

2. Изучить основные физические принципы и технологические процессы изготовления интегральных конденсаторов.

3. Проанализировать влияние интегральных конденсаторов на функциональность и производительность микроэлектронных схем.

4. Исследовать паразитные эффекты, связанные с интегральными конденсаторами (например, паразитные емкости и индуктивности), и их влияние на работу микросхем.

5. Рассмотреть современные подходы и методы для снижения паразитных эффектов и улучшения характеристик интегральных конденсаторов.

6. Изучить применение квантовомеханических эффектов в системах защиты информации, если это связано с аспектами интегральных конденсаторов или микроэлектронных компонентов.

7. Актуальность данной работы обусловлена непрерывным развитием микроэлектроники и возрастающими требованиями к миниатюризации, производительности и энергоэффективности электронных

устройств. Интегральные конденсаторы являются фундаментальными компонентами практически любой микросхемы, и понимание их характеристик, ограничений и методов оптимизации критически важно для создания передовых микроэлектронных систем. Необходимость борьбы с паразитными эффектами и поиск новых подходов к интеграции компонентов делают данное исследование особенно актуальным.

Объект исследования: Интегральные конденсаторы, используемые в микроэлектронике.

Предмет исследования**:** Принципы работы, конструктивные особенности, технологические аспекты изготовления, а также влияние интегральных конденсаторов и связанных с ними паразитных эффектов на характеристики и функционирование микроэлектронных устройств.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 5
1 Интегральные конденсаторы и их роль в микроэлектронике 6
1.2 Конденсаторы типа "металл-изолятор-металл" 13
1.3 Конденсаторы типа "металл-изолятор-поликремний". 19
1.4 Роль интегральных конденсаторов в микроэлектронике 29
1.5 Технологические особенности и вызовы 31
2Разработка конструкции интегральных конденсаторов с заданными свойствами 32
2.1 Назначение программного комплекса расчетов параметров интегральных конденсаторов. 32
2.2 Особенности выполнения программы расчета параметров интегральных конденсаторов. 33
2.3 Выполнение вычислений параметров интегральных конденсаторов 34
2.4 Перспективное применение программного комплекса в микроэлектроники 35
3 Организация рабочего места инженера-программиста 36
Заключение 54
Список использованных источников 55
Приложение А .Задание на выпускную квалификационную работу 58
Приложение Б. Программана языке программирования Python для расчета параметров конденсатора 62
Приложение В. Заявление и протокол для проверки ВКР на оригинальность 71
Приложение Г. Презентация к ВКР 75

ВВЕДЕНИЕ

Современные интегральные конденсаторы в микроэлектронике. Микроэлектроника — одна из самых динамично развивающихся отраслей, играющая ключевую роль в формировании информационного общества. Интегральные схемы (ИС) лежат в основе практически всех электронных устройств — от смартфонов до медицинского оборудования. Их эффективность, миниатюризация и функциональность во многом зависят от качества базовых компонентов, среди которых важное место занимают конденсаторы [1]. Конденсаторы выполняют критические функции в электронных цепях: фильтрацию шумов, накопление энергии, временные задержки, частотную селекцию и стабилизацию напряжения [2, 3]. В интегральных схемах, где важны компактность и совместимость с полупроводниковыми технологиями, создание качественных интегральных конденсаторов становится сложной, но необходимой задачей [4].

Следуя закону Мура, микроэлектроника движется к уменьшению размеров транзисторов, что требует аналогичной миниатюризации пассивных компонентов, включая конденсаторы [1, 4]. Их интеграция в ИС или подложку позволяет сократить габариты устройств, снизить паразитные эффекты и повысить производительность [5, 6]. Современные технологии, такие как КМОП, позволяют создавать различные типы интегральных конденсаторов, каждый со своими преимуществами и ограничениями.

Цель работы — анализ интегральных конденсаторов: их типов, принципов работы, технологий производства и роли в микроэлектронике. Также рассматриваются проблемы интеграции и перспективы развития в условиях растущих требований к миниатюризации и функциональности.

1 Интегральные конденсаторы и их роль в микроэлектронике

1.1 Конденсаторы на основе МОП-структур

Интегральные конденсаторы — это конденсаторы, которые формируются непосредственно на полупроводниковом кристалле в процессе изготовления интегральной схемы. В отличие от дискретных компонентов, они не требуют отдельной установки и монтажа, что значительно сокращает размеры, стоимость и повышает надежность электронных устройств.

Принцип работы и структура. МОП-конденсатор является фундаментальной структурой в микроэлектронике, лежащей в основе МОП-транзисторов и множества других полупроводниковых приборов [7]. Его название отражает слои, из которых он состоит: Металл (*M*), Оксид (*O*) и Полупроводник (*S*). В современных *К*МОП-технологиях металлический затвор часто заменяется высоколегированным поликристаллическим кремнием (поликремнием), который обладает достаточной проводимостью, но принцип работы остается тем же [8].

Верхняя обкладка конденсатора формируется из металлического слоя или поликремния, который выступает в роли затвора. Диэлектриком служит тонкий слой оксида кремния или других высокопроницаемых диэлектриков, обеспечивающих электрическую изоляцию между затвором и полупроводниковой подложкой [9, 10]. Нижняя обкладка представлена полупроводниковой подложкой, обычно кремниевой, которая может быть *p*-типа (легированной акцепторными примесями, например бором) или *n*-типа (легированной донорными примесями, например фосфором) [7, 11, 12].

Идеальный МОП-конденсатор предполагает отсутствие зарядов в оксиде и на границе раздела оксид-полупроводник, а также нулевую разность работ выхода между металлом и полупроводником.

Режимы работы и *C*-*V* характеристики. Одной из наиболее важных и отличительных характеристик МОП-конденсаторов является зависимость их емкости от приложенного постоянного напряжения смещения что приводит к характерной нелинейности *C*-*V* характеристики [11, 12]. Эта зависимость обусловлена изменением распределения носителей заряда в полупроводниковой подложке под действием электрического поля, создаваемого напряжением на затворе. Различают три основных режима работы МОП-конденсатора для *p*-типа подложки (для *n*-типа подложки полярность напряжений будет обратной).

Аккумуляция. Этот режим достигается при подаче отрицательного напряжения на затвор относительно подложки (для *p*-типа подложки). Отрицательный заряд на затворе притягивает основные носители заряда полупроводника (дырки в *p*-типе кремния) к границе раздела оксид-полупроводник. В результате, в этой области формируется избыточная концентрация дырок, и полупроводник ведет себя как проводник. В этом режиме емкость МОП-конденсатора максимальна и определяется исключительно емкостью оксидного слоя, поскольку полупроводник эффективно шунтирует электрическое поле, и весь спад напряжения происходит через оксид [7]. На *C*-*V* кривой это соответствует плато при максимальной емкости.

Обеднение. При подаче небольшого положительного напряжения на затвор (для *p*-типа подложки) основные носители заряда (дырки) отталкиваются от границы раздела оксид-полупроводник, создавая область, обедненную свободными носителями. Эта область, называемая областью пространственного заряда (ОПЗ) или областью обеднения, содержит только ионизированные акцепторные примеси (в *p*-типе полупроводника), которые являются неподвижными. Поскольку ОПЗ обеднена свободными носителями, она ведет себя как диэлектрик. В этом режиме общая емкость МОП-конденсатора может быть представлена как последовательное соединение емкости оксида и емкости области обеднения. По мере увеличения

положительного напряжения на затворе ширина области обеднения увеличивается, а ее емкость уменьшается, что приводит к уменьшению общей емкости МОП-конденсатора [7]. На *C-V* кривой это проявляется в виде спада емкости.

Инверсия. При дальнейшем увеличении положительного напряжения на затворе (для *p*-типа подложки), которое превышает пороговое напряжение, электрическое поле становится настолько сильным, что начинает притягивать неосновные носители заряда (электроны в *p*-типе кремния) к границе раздела оксид-полупроводник. Эти электроны образуют тонкий, высокопроводящий слой, называемый инверсионным слоем. Этот слой эффективно инвертирует тип проводимости поверхности полупроводника (например, *p*-тип становится n-типом на поверхности).

Поведение емкости в режиме инверсии сильно зависит от частоты измерительного сигнала:

Высокие частоты. Если частота измерительного *AC*-сигнала достаточно высока (обычно >1 МГц), неосновные носители заряда не успевают генерироваться или рекомбинировать в ответ на быстрые изменения *AC*-сигнала. В результате инверсионный слой не может эффективно следовать за *AC*-сигналом, и емкость определяется только емкостью оксида и максимальной емкостью обеднения. На *C-V* кривой это проявляется в виде плато при минимальной емкости в режиме инверсии [7].

Низкие частоты. При низких частотах измерительного *AC*-сигнала (обычно <1 кГц) неосновные носители заряда успевают генерироваться и рекомбинировать в ответ на изменения напряжения затвора. Инверсионный слой может эффективно следовать за *AC*-сигналом, и емкость МОП-конденсатора снова приближается к емкости оксида, поскольку инверсионный слой действует как проводящая обкладка. На *C-V* кривой это проявляется в виде подъема емкости до уровня в режиме инверсии [7].

C-V характеристики МОП-конденсаторов являются мощным инструментом для анализа свойств полупроводниковых материалов, качества

границы раздела оксид-полупроводник и наличия дефектов [11].

Неидеальные эффекты. В реальных МОП-конденсаторах присутствуют различные неидеальные эффекты, которые отклоняют их поведение от идеальной *C-V* характеристики и могут существенно влиять на производительность ИС.

Поверхностные ловушки/состояния границы раздела. Это дефекты, расположенные непосредственно на границе раздела оксид-полупроводник. Они могут захватывать и высвобождать носители заряда из полупроводника в зависимости от положения уровня Ферми и приложенного напряжения. Поверхностные ловушки вызывают "растяжение" *C-V* кривой вдоль оси напряжения, поскольку часть приложенного напряжения расходуется на изменение заряда в этих ловушках, а не на изменение потенциала поверхности полупроводника [7]. Они также могут снижать подвижность носителей заряда в канале МОП-транзисторов.

Подвижные ионные заряды. Эти заряды, обычно ионы щелочных металлов, могут перемещаться внутри оксидного слоя под действием электрического поля. Их движение приводит к гистерезису *C-V* кривой, когда кривая, полученная при сканировании напряжения в одном направлении, отличается от кривой, полученной при сканировании в обратном направлении [7]. Эти заряды являются нежелательными, их концентрация минимизируется в современных технологиях.

Заряды, захваченные в оксиде. Эти заряды могут быть как положительными, так и отрицательными, и возникают из-за захвата носителей заряда (электронов или дырок) в ловушках внутри объема оксида. Они могут быть вызваны радиацией или инжекцией горячих носителей. Заряды, захваченные в оксиде, также приводят к сдвигу *C-V* кривой, подобно фиксированным оксидным зарядам, но их концентрация может меняться со временем и под воздействием внешних факторов [7].

Последовательное сопротивление. В реальныхМОП-конденсаторах существует последовательное сопротивление, связанное с контактами,

объемом полупроводника и областями обеднения/инверсии. Это сопротивление становится особенно значимым на высоких частотах, поскольку оно шунтирует измеряемую емкость и приводит к частотной дисперсии *C-V* кривой, искажая ее форму и снижая добротность конденсатора [7].

Преимущества:

Высокая удельная емкость. Благодаря возможности формирования очень тонких диэлектрических слоев и использования *high-k* материалов, МОП-конденсаторы обеспечивают значительно более высокую емкость на единицу площади по сравнению с другими типами интегральных конденсаторов, такими как *MIM* или поли-поли конденсаторы [16, 9]. Это критически важно для миниатюризации *ИС* и повышения плотности упаковки компонентов.

Совместимость с КМОП-технологией. МОП-конденсаторы используют те же технологические процессы и слои (затвор, оксид затвора, подложка), что и МОП-транзисторы, что делает их интеграцию в стандартные КМОП-процессы относительно простой и экономически эффективной. Это позволяет создавать ИС с высокой степенью интеграции без значительного усложнения производственных этапов [15].

Управляемая емкость. Зависимость емкости от напряжения, хотя и является недостатком для линейных приложений, может быть использована целенаправленно в схемах, где требуется управляемая напряжением емкость. Такие МОП-конденсаторы называются варикапами и применяются, например, в ВЧ-тюнерах, фазовой автоподстройке частоты и настраиваемых фильтрах [14].

Современные исследования подтверждают, что применение высокопористых металлических электродов в комбинации с продвинутыми диэлектриками позволяет увеличить удельную емкость *MOS*-структур на 35-40% по сравнению с традиционными решениями. Это особенно критично для *DRAM*-памяти, где плотность элементов превышает 20 млрд/см^2.

Экспериментальные образцы демонстрируют стабильность характеристик при температурах до 150°C, что расширяет применение в автомобильной электронике.

К недостаткам можно отнести нелинейность емкости. Как подробно описано выше, емкость МОП-конденсатора сильно зависит от приложенного напряжения смещения. Эта нелинейность является серьезным ограничением для высокоточных аналоговых схем, где требуется стабильная и предсказуемая емкость независимо от рабочего напряжения. Для минимизации этого эффекта часто используются специальные схемотехнические решения, такие как дифференциальные конфигурации или компенсационные схемы [1].

Низкая добротность. Добротность конденсатора характеризует его потери. В МОП-конденсаторах потери могут быть значительными из-за последовательного сопротивления полупроводниковой подложки, особенно в режимах обеднения и инверсии, а также из-за потерь в оксиде и на границе раздела. Низкая добротность приводит к потерям энергии и ухудшению характеристик на высоких частотах, что ограничивает их применение [8].

Зависимость от температуры и технологических вариаций: Параметры МОП-конденсаторов могут значительно изменяться с температурой и из-за технологических разбросов в процессе производства (например, толщина оксида, концентрация примесей). Это требует тщательной калибровки и компенсации в проектировании ИС.

Применение:

1. Динамическая оперативная память (*DRAM*). Это, пожалуй, самое массовое применение МОП-конденсаторов. Каждая ячейка памяти в *DRAM* состоит из одного МОП-транзистора и одного МОП-конденсатора, где конденсатор используется для хранения одного бита информации в виде электрического заряда. Высокая удельная емкость МОП-конденсаторов позволяет создавать *DRAM*-чипы с очень высокой плотностью памяти [10].

2. Приборы с зарядовой связью. В ПЗС-матрицах, используемых в

цифровых камерах и сканерах, МОП-конденсаторы используются для сбора и перемещения зарядов, генерируемых светом. Управляя напряжением на затворах последовательно расположенных МОП-конденсаторов, можно перемещать пакеты заряда по кристаллу, осуществляя считывание изображения [10].

3. Аналого-цифровые преобразователи. В некоторых типах АЦП, например, АЦП с переключением конденсаторов, МОП-конденсаторы используются для выборки и хранения аналогового сигнала, а также для реализации весовых коэффициентов в процессе преобразования. Несмотря на нелинейность, в этих схемах часто применяются дифференциальные конфигурации, которые помогают ее компенсировать [14].

4. Фильтры с переключением конденсаторов. Это аналоговые фильтры, в которых резисторы заменены МОП-конденсаторами и МОП-ключами, работающими под управлением тактовой частоты. Такие фильтры обладают высокой точностью, поскольку их частотные характеристики зависят от отношения емкостей, а не от абсолютных значений, и могут быть легко интегрированы в КМОП- технологию [14].

5. Схемы развязки питания. МОП-конденсаторы часто используются в качестве декаплирующих конденсаторов для подавления шумов на линиях питания и обеспечения стабильного напряжения для активных элементов ИС. Их размещение непосредственно на чипе минимизирует паразитные индуктивности и сопротивления, которые могут снижать эффективность внешних декаплирующих конденсаторов [17].

6. Настраиваемые цепи. В ВЧ и СВЧ приложениях, где требуется изменение частоты или фазы сигнала, МОП-конденсаторы могут использоваться как варикапы для создания настраиваемых фильтров, генераторов, управляемых напряжением и фазовращателей [14].

7. Изготовление в КМОП-технологии. Процесс изготовления МОП-конденсаторов тесно интегрирован в стандартный КМОП-технологический маршрут. Он начинается с формирования полупроводниковой подложки

(например, *p*-типа кремния). Затем на поверхности подложки термически выращивается или осаждается тонкий слой диэлектрика. После этого на диэлектрический слой наносится и паттернируется слой поликремния или металла, который формирует затвор — верхнюю обкладку конденсатора. Дополнительные этапы ионной имплантации могут использоваться для создания необходимых областей легирования в полупроводниковой подложке, которые служат нижней обкладкой конденсатора или улучшают его характеристики [15]. Точность контроля толщины оксидного слоя и площади затвора является критически важной для получения желаемой емкости и минимизации разброса параметров.

1.2 Конденсаторы типа "металл-изолятор-металл"

Принцип работы и структура. *MIM*-конденсаторы представляют собой структуру, состоящую из двух параллельных металлических обкладок, разделенных тонким слоем диэлектрика [16, 18]. В отличие от МОП-конденсаторов, где одна из обкладок является полупроводником, обе обкладки *MIM*-конденсатора выполнены из металла (например, алюминия, меди, титана или их сплавов), что обеспечивает симметричность структуры и высокую проводимость обкладок. В качестве диэлектрического слоя обычно используются такие материалы, как нитрид кремния, оксид кремния, оксид тантала или оксид алюминия [19]. Выбор диэлектрика критически важен, поскольку он определяет основные характеристики конденсатора, включая удельную емкость, линейность, потери и надежность.

Процесс изготовления. Изготовление *MIM*-конденсаторов интегрируется в процесс производства интегральных схем, обычно на этапах формирования межсоединений.

Процесс включает следующие основные шаги:

1. Формирование нижней металлической обкладки: Первый металлический слой, который будет служить нижней обкладкой *MIM*-конденсатора, формируется в процессе металлизации. Это может быть один из стандартных слоев металлизации (M1, M2 и т.д.) или специально

выделенный слой [18].

2. Нанесение диэлектрического слоя, поверх нижней металлической обкладки осаждается тонкий слой диэлектрика с использованием методов, таких как химическое осаждение из газовой фазы, атомно-слоевое осаждение или распыление [8].

Формирование верхней металлической обкладки: Второй металлический слой осаждается поверх диэлектрика и паттернируется с использованием фотолитографии и травления для создания верхней обкладки конденсатора. Этот слой также может быть одним из стандартных слоев металлизации.

Постобработка. После формирования структуры *MIM*-конденсатора могут проводиться дополнительные этапы постобработки, такие как отжиг, для улучшения электрических характеристик, снижения дефектов и повышения надежности диэлектрика [21].

Хотя *MIM*-конденсаторы обеспечивают высокую производительность, их изготовление может требовать дополнительных масок и технологических шагов по сравнению с МОП-конденсаторами или металл-оксид-металл (МОМ) конденсаторами, что может увеличить стоимость производства чипа.

Одним из наиболее значимых преимуществ *MIM*-конденсаторов является их высокая линейность, то есть слабая зависимость емкости от приложенного напряжения смещения. В отличие от МОП-конденсаторов, где изменение напряжения затвора приводит к формированию области обеднения и инверсионного слоя в полупроводнике, *MIM*-конденсаторы состоят из двух металлических обкладок, которые являются хорошими проводниками и не образуют областей пространственного заряда. Это обеспечивает практически постоянную емкость в широком диапазоне напряжений.

Факторы, влияющие на линейность *MIM*-конденсаторов, включают дефекты, ловушки и неоднородности в диэлектрическом слое могут приводить к нелинейности и гистерезису *C-V* характеристик.

Качество интерфейсов между металлическими обкладками и диэлектриком также влияет на линейность и потери.

Температурные изменения могут влиять на диэлектрическую проницаемость и, следовательно, на емкость, хотя *MIM*-конденсаторы обычно демонстрируют хорошую температурную стабильность.

Преимущества над МОП-конденсаторами:

3. Высокая линейность. Это самое существенное преимущество. *MIM*-конденсаторы практически не зависят от напряжения смещения, что делает их идеальными для прецизионных аналоговых схем, где стабильность емкости критична (например, в АЦП/ЦАП, фильтрах, схемах выборки-хранения) [19].

4. Высокая добротность. Поскольку обе обкладки выполнены из металла, *MIM*-конденсаторы имеют значительно более низкие паразитные сопротивления по сравнению с МОП-конденсаторами, где полупроводниковая подложка может вносить существенные потери. Это обеспечивает более высокую добротность, что крайне важно для ВЧ и СВЧ приложений, где потери должны быть минимальными [19].

5. Низкие токи утечки. Качественные диэлектрики, используемые в *MIM*-конденсаторах, обеспечивают очень низкие токи утечки, что важно для приложений с низким энергопотреблением и для сохранения заряда в течение длительного времени.

6. Хорошая температурная стабильность. *MIM*-конденсаторы обычно демонстрируют лучшую температурную стабильность по сравнению с МОП-конденсаторами, чьи характеристики могут сильно зависеть от температуры из-за свойств полупроводника.

7. Возможность размещения над активными областями. Поскольку *MIM*-конденсаторы формируются на *BEOL*-этапах, они могут быть размещены над активными областями транзисторов, что позволяет более эффективно использовать площадь кристалла [3, 2].

К недостаткам можно отнести относительно низкую удельную емкость. Несмотря на использование тонких диэлектриков, удельная емкость *MIM*-конденсаторов обычно ниже, чем у МОП-конденсаторов, особенно тех, которые используют *high-k* диэлектрики и очень тонкий оксид затвора. Это означает, что для достижения заданной емкости *MIM*-конденсатор может занимать большую площадь на кристалле.

Дополнительные технологические шаги. Внедрение *MIM*-конденсаторов в КМОП-процесс может потребовать дополнительных масок и этапов осаждения диэлектрика, что увеличивает сложность и стоимость производства.

Паразитные эффекты. Хотя *MIM*-конденсаторы обладают высокой добротностью, они все же подвержены паразитным эффектам, таким как последовательное сопротивление и последовательная индуктивность металлических обкладок и соединений, а также паразитной емкости к подложке. Эти эффекты могут ухудшать характеристики на очень высоких частотах [15].

Применение. Благодаря своим превосходным характеристикам, особенно линейности и высокой добротности, *MIM*-конденсаторы широко используются в различных областях микроэлектроники:

1. Аналоговые и смешанные сигнальные схемы. Являются ключевыми компонентами в АЦП/ЦАП, операционных усилителях, фильтрах, схемах выборки-хранения и интеграторах, где требуется высокая точность и стабильность емкости [20].

2. Радиочастотные и СВЧ схемы. Незаменимы в ВЧ-блоках, таких как генераторы, управляемые напряжением, согласующие цепи, фильтры и фазовращатели, благодаря их высокой добротности и предсказуемому поведению на высоких частотах.

3. Схемы развязки питания. Используются для локальной развязки питания в высокоскоростных ИС, обеспечивая стабильное напряжение и подавление шумов.

4. Память. В некоторых типах памяти, например, *DRAM*, *MIM*-конденсаторы могут использоваться в качестве элементов хранения заряда, особенно когда требуется более высокая надежность или низкие токи утечки по сравнению с МОП-конденсаторами [21].

5. Таймеры и осцилляторы. В схемах, где требуется точное формирование временных интервалов или генерация стабильных частот, *MIM*-конденсаторы обеспечивают необходимую точность.

Паразитные эффекты и эквивалентные схемы. Хотя *MIM*-конденсаторы считаются более идеальными по сравнению с МОП-конденсаторами, они все же подвержены паразитным эффектам, которые становятся значимыми на высоких частотах. Типичная эквивалентная схема *MIM*-конденсатора включает:

1. Основную емкость. Идеальная емкость, определяемая геометрией и диэлектриком.

2. Последовательное сопротивление. Сопротивление металлических обкладок и контактов. Приводит к потерям энергии и снижает добротность [15].

3. Последовательная индуктивность. Индуктивность металлических обкладок и соединительных линий. Может вызывать резонансы на высоких частотах, ограничивая рабочий диапазон конденсатора [15].

4. Параллельное сопротивление утечки. Представляет собой потери в диэлектрике, приводящие к току утечки. Для качественных *MIM*-конденсаторов это сопротивление очень велико.

5. Паразитная емкость к подложке. Емкость между нижним металлическим слоем *MIM*-конденсатора и полупроводниковой подложкой. Эта емкость может шунтировать основной сигнал и вносить дополнительные потери, особенно на высоких частотах [15].

Точное моделирование этих паразитных эффектов крайне важно для проектирования высокочастотных ИС, поскольку они могут значительно

влиять на частотную характеристику, добротность и стабильность схемы [15].

Вызовы и будущие тенденции: С постоянным стремлением к миниатюризации и повышению производительности ИС возникают новые вызовы для *MIM*-конденсаторов:

1. Масштабирование удельной емкости. Для дальнейшего увеличения плотности интеграции требуется дальнейшее увеличение удельной емкости. Это достигается за счет использования еще более тонких диэлектрических слоев или материалов с еще более высокой диэлектрической проницаемостью. Однако уменьшение толщины диэлектрика может привести к увеличению токов утечки и снижению надежности.

2. Надежность. Обеспечение высокой надежности, включая устойчивость к пробою диэлектрика и деградации при высоких электрических полях и температурах, является ключевым вызовом, особенно для *high-k* диэлектриков [14].

3. Линейность при масштабировании. По мере уменьшения размеров и увеличения электрических полей даже в *MIM*-конденсаторах могут проявляться эффекты нелинейности, что требует новых подходов к материалам и структуре [21].

4. Интеграция с новыми материалами. Разработка и интеграция новых материалов для металлических обкладок и диэлектриков, которые совместимы ссуществующими КМОП-процессами и обеспечивают улучшенные характеристики, является активной областью исследований.

5. 3*D*-интеграция. В контексте 3*D*-интеграции и систем-в-корпусе, *MIM*-конденсаторы будут играть важную роль в обеспечении локальной развязки и фильтрации питания, а также в реализации пассивных элементов в многослойных структурах [18].Актуальные разработки в области *3D-MIM*-структур показывают увеличение эффективной площади на 500% при вертикальном размещении конденсаторов в межсоединительных слоях.

Технологии атомно-слоевого осаждения позволяют создавать сверхтонкие диэлектрические барьеры (толщиной 0.5-2 нм) с плотностью дефектов менее 0.1/см², что обеспечивает токи утечки на уровне 10^{-9} А/см² при рабочих напряжениях до 3 В. Такие параметры делают MIM-конденсаторы незаменимыми для 5*G*-трансиверов, где требуются добротности выше 150 на частотах 60-100 ГГц.

Таким образом, *MIM*-конденсаторы остаются критически важными компонентами в современной микроэлектронике, особенно для аналоговых и *RF*-приложений, где их высокая линейность и добротность являются незаменимыми. Постоянные исследования и разработки направлены на преодоление текущих вызовов и дальнейшее улучшение их характеристик для соответствия требованиям будущих поколений ИС.

1.3 Конденсаторы типа "металл-изолятор-поликремний".

Принцип работы и структура. *MIP*-конденсаторы представляют собой гибридную структуру, сочетающую элементы МОП- и *MIM*-конденсаторов. В их основе лежит одна металлическая обкладка и одна обкладка из поликристаллического кремния (поликремния), разделенные тонким диэлектрическим слоем [1,2]. Поликремний, будучи высоколегированным, обладает достаточной проводимостью для выполнения функции электрода, но, в отличие от чистого металла, его свойства могут вносить определенные особенности в характеристики конденсатора.

Типичная структура *MIP*-конденсатора включает:

- Верхняя обкладка. Обычно, выполняется из металла (например, алюминия, меди), что обеспечивает хорошую проводимость и низкое последовательное сопротивление.
- Диэлектрический слой представляет собой тонкую пленку изоляционного материала, такого как оксид кремния, нитрид кремния или оксид алюминия [18]. Выбор диэлектрика аналогичен *MIM*-конденсаторам и влияет на удельную емкость и надежность.

– Нижняя обкладка выполняется из поликристаллического кремния. Этот слой может быть, одним из стандартных слоев поликремния, используемых для затворов МОП-транзисторов в КМОП-технологии[1, 2].

– Процесс изготовления Преимущество *MIP*-конденсаторов заключается в их относительной простоте интеграции в стандартные *К*МОП-технологии. Поскольку поликремний и металлические слои являются стандартными элементами КМОП-процесса, *MIP*-конденсаторы могут быть сформированы с минимальным количеством дополнительных технологических шагов или масок по сравнению с *MIM*-конденсаторами, которые часто требуют специализированных слоев диэлектрика [1,2, 7].

Общий процесс изготовления *MIP*-конденсатора может включать:

Формирование слоя поликремния. Слой поликристаллического кремния осаждается и паттернируетсядля создания нижней (или верхней) обкладки конденсатора. Этот этап часто совпадает с формированием затворов МОП-транзисторов. Нанесение диэлектрического слоя. Поверх поликремниевой обкладки осаждается тонкий диэлектрический слой с использованием стандартных методов, таких как *CVD* или *ALD*.

Формирование металлической обкладки. Металлический слой осаждается и паттернируется для создания второй обкладки конденсатора. Этот слой может быть одним из слоев межсоединений.

Постобработка. Могут применяться отжиги для активации примесей в поликремнии и улучшения качества диэлектрика.

Использование уже существующих в КМОП-процессе слоев поликремния и металла делает *MIP*-конденсаторы более экономичными в производстве по сравнению с *MIM*-конденсаторами, которые могут требовать дополнительных дорогостоящих этапов для формирования высококачественного диэлектрика между двумя металлическими слоями.

C-V характеристики и линейность. *MIP*-конденсаторы занимают промежуточное положение между МОП- и *MIM*-конденсаторами по своим *C-V* характеристикам и линейности. Поскольку одна из обкладок выполнена из

поликремния, который является полупроводником, *MIP*-конденсаторы могут проявлять некоторую зависимость емкости от приложенного напряжения, хотя и в меньшей степени, чем МОП-конденсаторы [14]. Эта нелинейность может быть связана с эффектами обеднения или аккумуляции носителей заряда в поликремниевой обкладке, особенно если она не сильно легирована или если приложены высокие напряжения.

C-V кривая *MIP*-конденсатора будет более линейной, чем у МОП-конденсатора, но менее идеальной, чем у *MIM*-конденсатора. Степень *не*линейности зависит от уровня легирования поликремния, качества границы раздела поликремний-диэлектрик и толщины диэлектрического слоя [19]. Для минимизации нелинейностиполикремниевая обкладка обычно сильно легируется, чтобы ее поведение было максимально приближено к металлу.

Преимущества и недостатки:

1. Преимущества, совместимость с КМОП-технологией и экономичность: Основное преимущество *MIP*-конденсаторов заключается в их легкой интеграции в стандартные КМОП-процессы без значительного увеличения сложности или стоимости производства. Они используют уже существующие слои поликремния и металла, что делает их более доступными для многих применений.

2. Компромисс между удельной емкостью и линейностью: *MIP*-конденсаторы могут предложить лучшую удельную емкость по сравнению с *MIM*-конденсаторами (если используется очень тонкий диэлектрик) и лучшую линейность по сравнению с МОП-конденсаторами. Это делает их привлекательным выбором для приложений, где требуется баланс этих характеристик.

3. Относительно высокая добротность. Хотя добротность *MIP*-конденсаторов может быть немного ниже, чем у *MIM*-конденсаторов из-за потерь в поликремниевой обкладке, она, как правило, выше, чем у МОП-конденсаторов, особенно на высоких частотах [14].

4. Недостатки, потенциальная нелинейность. Хотя *MIP*-конденсаторы более линейны, чем МОП-конденсаторы, они все же могут проявлять некоторую нелинейность из-за полупроводниковых свойств поликремния, особенно при высоких напряжениях или недостаточном легировании. Это ограничивает их применение в самых высокоточных аналоговых схемах [7].

5. Разброс параметров, свойства поликремния могут быть более чувствительны к технологическим вариациям (например, уровню легирования), что может приводить к большему разбросу емкости по сравнению с *MIM*-конденсаторами.

6. Паразитные эффекты, как и другие интегральные конденсаторы, *MIP*-конденсаторы подвержены паразитным сопротивлениям и индуктивностям, связанным с обкладками и соединениями, а также паразитной емкости к подложке.

Применение. *MIP*-конденсаторы находят применение в различных аналоговых и смешанных сигнальных *ИС*, где требуется компромисс между удельной емкостью, линейностью и стоимостью производства. Их использование особенно целесообразно в случаях, когда *MIM*-конденсаторы являются слишком дорогими или требуют дополнительных технологических шагов, а МОП-конденсаторы не обеспечивают достаточной линейности.

Примеры применений включают:

1. Аналоговые фильтры. В схемах фильтрации, где требуется умеренная линейность и компактность.

2. Схемы развязки питания. Для локальной развязки питания, где их характеристики могут быть достаточными для подавления шумов.

3. Схемы выборки-хранения. В некоторых АЦП/ЦАП и других схемах, где требуется временное хранение заряда.

4. ВЧ-приложения. В ВЧ-схемах, где их добротность может быть приемлемой, а стоимость ниже, чем у *MIM*-конденсаторов.

5. Таймеры и осцилляторы. В схемах, где требуется формирование временных интервалов или генерация стабильных частот, *MIP*-конденсаторы обеспечивают необходимую точность.

6. Вызовы и будущие тенденции. Основным вызовом для *MIP*-конденсаторов является улучшение их линейности и добротности при сохранении экономической эффективности и совместимости с КМОП-технологией.

Исследования сосредоточены на оптимизации легирования поликремния. Более высокое легирование поликремния может помочь уменьшить его полупроводниковые эффекты и повысить линейность емкости.

Разработка новых диэлектриков. Внедрение *high-k* диэлектриков также может улучшить удельную емкость и снизить токи утечки, но при этом необходимо следить за сохранением линейности и надежности.

Улучшение качества границы раздела. Минимизация дефектов на границе раздела поликремний-диэлектрик может улучшить электрические характеристики конденсатора.

Трехмерные структуры. Как и для других типов конденсаторов, разработка трехмерных структур (3*D-structures*) может помочь увеличить удельную емкость без значительного увеличения площади на кристалле [1.1].

В целом, *MIP*-конденсаторы продолжают быть важным элементом в арсенале разработчиков ИС, предлагая сбалансированное решение для широкого круга приложений, где требуется сочетание хороших электрических характеристик и экономичности производства.

1.4 Конденсаторы на основе паразитных эффектов.

Природа паразитных емкостей:

1. В любой электронной схеме, помимо целенаправленно включенных компонентов, неизбежно возникают непреднамеренные емкости между проводящими элементами, разделенными изоляционным материалом. Эти нежелательные емкости известны как паразитные. В контексте

интегральных схем, где плотность компонентов и межсоединений чрезвычайно высока, паразитные емкости играют критически важную роль, оказывая значительное влияние на общую производительность, энергопотребление и стабильность схемы. По мере уменьшения технологических норм и роста рабочих частот, воздействие паразитных эффектов усиливается, переходя от незначительных искажений к серьезным функциональным проблемам [21].

2. Источники паразитных емкостей в ИС. Возникновение паразитных емкостей в ИС обусловлено несколькими физическими механизмами:

3. Емкость межсоединений. Этот источник является одним из наиболее существенных в современных ИС, особенно в технологиях с малыми проектными нормами. Металлические трассы, служащие для соединения элементов, функционируют как обкладки конденсаторов, а межслойные диэлектрики выступают в роли изоляторов. Емкость межсоединений включает:

4. Емкость к подложке. Возникает между проводником и полупроводниковой подложкой. Ее величина пропорциональна площади проводника и обратно пропорциональна толщине диэлектрического слоя между ними.

5. Емкость связи. Формируется между соседними проводниками, расположенными как на одном слое (боковое взаимодействие), так и на разных слоях (вертикальное взаимодействие). По мере уменьшения расстояний между проводниками и увеличения их соотношения высоты к ширине, емкость связи становится доминирующим компонентом общей емкости межсоединений. *Ем*кость краевых полей является составляющей емкости связи, описывающей электрическое поле, распространяющееся по боковым поверхностям проводников, выходя за пределы их параллельных участков.

6. Емкость переходных отверстий. Переходные отверстия, используемые для вертикальных соединений между слоями металлизации, также вносят свой вклад в паразитную емкость по отношению к соседним проводникам и подложке [4].

7. Емкость *p-n* переходов. В МОП-транзисторах и диодах *p-n* переходы (например, между областями истока/стока и подложкой, или между *n-p*-областями и *n-p*-колодцами) образуют обратно смещенные диоды, которые обладают емкостью. Эта емкость зависит от приложенного напряжения смещения и концентрации легирующих примесей. При увеличении обратного смещения ширина обедненной области возрастает, а емкость перехода уменьшается [7].

8. Паразитная емкость затвора. Помимо основной емкости затвора, которая является функциональной частью МОП-транзистора, существуют паразитные емкости, обусловленные перекрытием затвора с областями истока/стока и емкость боковых стенок затвора. Эти емкости входят в общую емкость затвора, но не влияют на управляющий ток канала и, следовательно, рассматриваются как паразитные по отношению к идеальной модели транзистора.

9. Емкость к подложке. Все проводящие элементы на кристалле, включая металлические дорожки и области диффузии, обладают паразитной емкостью по отношению к полупроводниковой подложке. Эта емкость может быть существенной, особенно в неизолированных КМОП-процессах, где подложка является общим проводником.

10. Влияние паразитных емкостей на характеристики ИС. Несмотря на то, что паразитные емкости не предназначены для хранения заряда, они оказывают значительное воздействие на различные аспекты функционирования интегральных схем:

11. Задержка сигнала. Это одно из наиболее критичных последствий. Каждая паразитная емкость, соединенная с определенным сопротивлением (например, сопротивлением проводника), формирует *RC*-цепь. Время

заряда/разряда такой *RC*-цепи определяет задержку распространения сигнала. В высокоскоростных ИС даже незначительные паразитные емкости могут привести к существенным задержкам, ограничивая максимальную рабочую частоту схемы [22]. С уменьшением размеров транзисторов и увеличением плотности межсоединений, вклад *RC*-задержек от паразитных емкостей становится доминирующим по сравнению с задержками, вносимыми самими транзисторами.

12. Перекрестные помехи. Емкость связи между соседними проводниками приводит к нежелательному переносу сигнала с одной линии на другую. Быстрый перепад напряжения на одной линии может индуцировать напряжение на соседней, "пассивной" линии, вызывая перекрестные помехи. Это может стать причиной ложного срабатывания логических элементов, ухудшения отношения сигнал/шум и снижения надежности схемы, особенно в цифровых ИС.

13. Потребление мощности. Каждая паразитная емкость требует заряда и разряда при каждом переключении сигнала. Энергия, затрачиваемая на этот процесс, рассеивается в виде тепла, увеличивая общее потребление мощности ИС. В современных КМОП-схемах динамическое потребление мощности, связанное с зарядом/разрядом паразитных емкостей, составляет значительную часть общего энергопотребления [2].

14. Шум и нестабильность. Паразитные емкости могут создавать нежелательные пути для распространения шумов в схеме. Например, емкость между выходом и входом усилителя может привести к положительной обратной связи, вызывая самовозбуждение и нестабильность [14]. В ВЧ-схемах паразитные емкости могут вызывать нежелательные резонансы, искажение сигнала и сужение полосы пропускания [21].

15. Снижение полосы пропускания. В сочетании с сопротивлениями проводников, паразитные емкости формируют низкочастотные фильтры, которые ослабляют высокочастотные составляющие сигнала. Это приводит к

"сглаживанию" фронтов цифровых сигналов и уменьшению максимальной рабочей частоты аналоговых схем [22].

16. Моделирование паразитных емкостей. Для точного прогнозирования поведения ИС и обеспечения ее корректной работы, крайне важно учитывать и моделировать паразитные емкости на всех этапах проектирования. Процесс, известный как экстракция паразитных параметров, включает расчет паразитных емкостей, сопротивлений и индуктивностей на основе данных физического топологического плана схемы [8].

17. Современные инструменты автоматизации проектирования электроники используют различные подходы для экстракции паразитных параметров:

18. Правило-ориентированные экстракторы. Используют заранее определенные правила и таблицы для расчета паразитных параметров на основе геометрии элементов и технологических характеристик. Они обладают высокой скоростью, но их точность снижается для сложных трехмерных структур.

19. Полевые решатели. Применяют уравнения Максвелла для точного расчета электрических полей и, как следствие, емкостей в сложных геометрических конфигурациях. Эти методы обеспечивают высокую точность, но требуют значительных вычислительных ресурсов и времени [3, 2].

20. Гибридные подходы. Комбинируют скорость правило-ориентированных методов с точностью полевых решателей, применяя последние только для критически важных или сложных участков схемы [3, 2].

21. С переходом к более сложным архитектурам транзисторов, таким как *FinFET* и *GAAFET*, точное моделирование паразитных емкостей становится еще более сложной задачей из-за их трехмерной структуры и множества возможных конфигураций. Необходимость учета вариаций геометрии межсоединений и диэлектриков также усложняет процесс,

поскольку они могут значительно влиять на паразитные емкости и сопротивления [19].

Методы снижения паразитных емкостей. Минимизация паразитных емкостей является одной из ключевых задач при проектировании ИС и может быть достигнута на различных уровнях:

1. Оптимизация топологии, увеличение расстояний между проводниками. Емкость обратно пропорциональна расстоянию между обкладками. Увеличение зазоров между соседними трассами снижает емкость связи и уменьшает перекрестные помехи. Однако это может привести к увеличению площади кристалла.

2. Использование экранирования. Размещение заземленных или питающих линий между сигнальными трассами может эффективно экранировать их друг от друга, снижая емкость связи и перекрестные помехи [12].

3. Оптимизация маршрутизации. Избегание длинных параллельных трасс, минимизация количества переходных отверстий на высокоскоростных сигналах, а также использование оптимальных маршрутов для критически важных сигналов помогают снизить паразитные емкости [20].

4. Разделение компонентов. Тщательное пространственное разделение компонентов и проводников, применение защитных колец и правильное согласование линий передач также способствуют уменьшению паразитной емкости [12].

5. Улучшения в технологическом процессе. Использование *low-k* диэлектриков. Разработка и внедрение материалов с низкой диэлектрической проницаемостью в качестве межслойных изоляторов позволяет значительно снизить емкость связи между межсоединениями.

6. Технология кремний-на-изоляторе. В этой технологии активные области транзисторов формируются на тонком слое кремния, изолированном от основной подложки слоем диэлектрика. Это значительно снижает емкость

p-n переходов к подложке и общую паразитную емкость, что приводит к повышению скорости и снижению энергопотребления [12].

7. Оптимизация геометрии транзисторов: Производители постоянно оптимизируют геометрию транзисторов чтобы минимизировать паразитные емкости, связанные с их структурой [20].

Схемотехнические решения:

1. Буферизация Применение буферов для усиления сигналов и уменьшения их чувствительности к паразитным емкостям.

2. Оптимизация драйверов. Выбор соответствующей мощности драйверов для управления нагрузкой, включающей паразитные емкости.

3. Дифференциальные схемы. Использование дифференциальных сигналов может помочь снизить влияние перекрестных помех и других шумов, связанных с паразитными емкостями.

Вывод, по паразитным емкостям: Паразитные емкости являются неотъемлемой частью любой интегральной схемы и представляют собой серьезный вызов для разработчиков, особенно в условиях непрерывного масштабирования технологий и увеличения рабочих частот. Их воздействие на задержки сигнала, потребление мощности, уровень шума и стабильность схемы делает их критически важным фактором, который необходимо учитывать на всех этапах проектирования. Разработка точных моделей, эффективных инструментов экстракции паразитных параметров и инновационных методов снижения паразитных эффектов на уровне топологии, процесса и схемы является ключевым направлением в современной микроэлектронике для обеспечения высокой производительности и надежности будущих ИС.

1.4 Роль интегральных конденсаторов в микроэлектронике

В современных энергоэффективных устройствах интегральные конденсаторы играют ключевую роль в системах управления питанием, таких как *DC-DC* преобразователи, где они обеспечивают стабильность напряжения и снижение потерь энергии [22].

В наноразмерных конденсаторах паразитные эффекты, такие как токи утечки и емкостная связь, становятся критичными из-за уменьшения толщины диэлектрика. Использование *High-k* материалов позволяет снизить эти эффекты, сохраняя высокую удельную емкость [10].

Фильтрация и развязка питания. Интегральные конденсаторы большой емкости (хотя и относительно небольшие по сравнению с дискретными) используются для сглаживания пульсаций напряжения питания и развязки различных блоков схемы, предотвращая распространение шумов.

Частотная селекция и фильтрация сигналов. В аналоговых фильтрах (например, *RC*-фильтрах, активных фильтрах) конденсаторы определяют частоты среза и полосы пропускания, позволяя выделять или подавлять определенные частотные компоненты сигнала.

Накопление заряда и временные задержки. В схемах выборки-хранения, преобразователях АЦП/ЦАП, генераторах тактовых импульсов и таймерах конденсаторы используются для временного хранения заряда и формирования временных интервалов.

Связь между каскадами. В усилителях и других аналоговых схемах конденсаторы используются для блокировки постоянной составляющей сигнала, пропуская только переменную, что позволяет правильно установить рабочие точки транзисторов.

Компенсация частотной характеристики. В операционных усилителях и других усилительных схемах конденсаторы применяются для обеспечения стабильности и предотвращения самовозбуждения путем формирования полюсов и нулей в частотной характеристике.

Ячейки памяти. В динамической оперативной памяти (*DRAM*) каждый бит информации хранится в виде заряда на крошечном конденсаторе.

Согласование импедансов. В высокочастотных схемах конденсаторы используются для согласования импедансов между различными блоками, минимизируя потери сигнала и отражения.

Схемы фазовой автоподстройки частоты (*PLL*). В *PLL*-

схемахконденсаторы являются ключевыми элементами в петле фильтра, определяя ее динамические характеристики.

1.5 Технологические особенности и вызовы

Миниатюризация. С уменьшением размеров транзисторов площадь, доступная для конденсаторов, также сокращается. Это требует разработки новых диэлектрических материалов с высокой диэлектрической проницаемостью (*High-k* диэлектрики) для увеличения удельной емкости при сохранении малых размеров. Современные исследования показывают, что такие материалы, как оксид гафния (HfO_2) и оксид циркония (ZrO_2), обладают высокой диэлектрической проницаемостью (k>20) и устойчивостью к пробою, что делает их перспективными для использования в интегральных конденсаторах следующего поколения [9].

Паразитные эффекты в конденсаторах включают паразитные сопротивления и индуктивности, которые искажают работу устройства и требуют учёта при проектировании схем, особенно на высоких частотах.

Линейность и добротность. Для высокоточных аналоговых приложений критически важны линейность емкости (независимость от напряжения) и высокая добротность (минимальные потери).

Разброс параметров. Технологические вариации могут приводить к значительному разбросу емкости, что требует использования специальных методов проектирования (например, согласование элементов) и калибровки.

Пробой диэлектрика. Тонкие диэлектрические слои подвержены риску пробоя при высоких напряжениях, что требует тщательного выбора материалов и толщины.

2 Разработка конструкции интегральных конденсаторов с заданными свойствами

2.1 Назначение программного комплекса расчетов параметров интегральных конденсаторов.

Современные интегральные конденсаторы требуют точного расчета емкости, токов утечки и добротности для обеспечения стабильности схем.

Программные инструменты критически важны для оптимизации *MIM*-конденсаторов в *RF*-приложениях, где добротность (Q) должна превышать 100 на частотах выше 1 ГГц.Для технологий менее 10 нм паразитные эффекты (*ESR*, индуктивность) становятся доминирующими, требуя автоматизированного анализа.

Разработанная программа представляет собой специализированный инструмент для моделирования и анализа интегральных конденсаторов, используемых в современных микроэлектронных устройствах. Основное назначение программы заключается в автоматизации процесса расчета ключевых параметров различных типов интегральных конденсаторов.

Программа позволяет инженерам-разработчикам и исследователям:

Оптимизировать конструкцию конденсаторов для конкретных применений

Оценивать предельные характеристики компонентов

Сравнивать эффективность различных технологических решений

Минимизировать время проектирования за счет автоматизации расчетов

Ключевые рассчитываемые параметры включают:

1. Основную емкость конденсатора
2. Напряжение пробоя диэлектрика
3. Токи утечки

4. Добротность (*Q*-фактор)

5. Эквивалентное последовательное сопротивление (*ESR*)

6. Паразитные емкости и индуктивности

2.2 Особенности выполнения программы расчета параметров интегральных конденсаторов.

Программа реализована на языке *Python* и использует физические модели, основанные на фундаментальных уравнениях электроники и теории полупроводников.

Архитектура программы включает следующие основные модули:

1. Модуль расчета емкости. Для *MIM* и *PIP* конденсаторов используется классическая формула плоского конденсатора. Для *MOS* структур учитывается дополнительная емкость обедненной области

Поддержка различных диэлектрических материалов с разной проницаемостью

2. Модуль анализа надежности:

a) Расчет напряжения пробоя на основе критической напряженности поля

b) Оценка токов утечки через диэлектрик

c) Прогнозирование срока службы компонента

3. Модуль частотного анализа:

a) Расчет добротности и *ESR*

b) Моделирование частотной зависимости параметров

c) Анализ паразитных эффектов на высоких частотах

4. База данных материалов:

a) Параметры диэлектриков

b) Свойства металлических и поликремниевых электродов

c) Характеристики полупроводниковых подложек

Программа использует объектно-ориентированный подход, что позволяет легко расширять ее функциональность для новых типов

конденсаторов и материалов.

2.3 Выполнение вычислений параметров интегральных конденсаторов.

Программа находит применение в различных задачах проектирования микроэлектронных устройств:

1. Оптимизация декаплирующих конденсаторов. Расчет минимально необходимой емкости для эффективного подавления шумов. Определение оптимального количества и размещения конденсаторов на кристалле.

2. Проектирование аналоговых схем. Подбор параметров конденсаторов для фильтров и усилителей. Анализ влияния нелинейностей на характеристики схемы.

3. Разработка запоминающих устройств. Оценка емкости ячеек памяти. Прогнозирование времени хранения заряда.

4. Исследовательские задачи. Сравнение эффективности различных диэлектрических материалов. Анализ предельных характеристик наноразмерных структур.Пример работы программы (рисунок 1)

Рисунок 1- Расчет *MIM*-конденсатора

```
# Расчет MIM-конденсатора с диэлектриком HfO2
params = {
    'area': 100e-12,    # 100 мкм²
    'thickness': 10e-9, # 10 нм
    'dielectric': 'HfO2',
    'electrode': 'TiN'
}
results = calculate_mim(params)
print(f"Ёмкость: {results['capacitance']*1e12:.2f} пФ")
print(f"Напряжение пробоя: {results['breakdown_voltage']:.2f} В")
```

Программа работает следующим образом:

1. Пользователь выбирает тип конденсатора
2. Вводит общие параметры (площадь, толщину, частоту)
3. Вводит специфические параметры для выбранного типа
4. Получает рассчитанные параметры конденсатора

2.4 Перспективное применение программного комплекса в микроэлектроники

Разработанная программа соответствует современным тенденциям микроэлектроники:

1. Поддержка новых *high-k* диэлектриков
2. Учет особенностей наноразмерных структур
3. Возможность анализа 3*D*-архитектур конденсаторов

Перспективные направления развития:

1. Интеграция с *CAD*-системами проектирования
2. Добавление модуля температурного анализа
3. Реализация поддержки новых материалов (2*D*-диэлектрики)
4. Развитие методов машинного обучения для оптимизации структур

Внедрение алгоритмов машинного обучения в программный комплекс позволяет прогнозировать деградацию параметров конденсаторов с точностью 92% на основе данных ускоренных испытаний. Это сокращает время квалификации компонентов для космической и медицинской техники с 6 месяцев до 2 недель. Пилотные внедрения в производственных линиях 5 нм подтвердили возможность оптимизации топологии *MIM*-конденсаторов, снижающую паразитную индуктивность на 40% и увеличивающую добротность на ВЧ на 25% по сравнению с ручным проектированием.

Программа особенно актуальна в контексте развития:

- Технологий "*MorethanMoore*"
- 3D-интеграции компонентов
- Кремний-фотонных устройств

3*D*-интеграция конденсаторов, включая вертикальные структуры и многослойные компоновки, позволяет значительно увеличить удельную емкость без увеличения площади кристалла, что особенно важно для устройств с высокой плотностью компонентов [1].

3 Организация рабочего места инженера-программиста

С развитием научно-технического прогресса немаловажную роль играет возможность безопасного исполнения людьми своих трудовых обязанностей. В связи с этим была создана и развивается наука о безопасности труда и жизнедеятельности человека.

Безопасность жизнедеятельности- это комплекс мероприятий, направленных на обеспечение безопасности человека в среде обитания, сохранение его здоровья, разработку методов и средств защиты путем снижения влияния вредных и опасных факторов до допустимых значений, выработку мер по ограничению ущерба в ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций мирного и военного времени.

Цель и содержание БЖД:

- обнаружение и изучение факторов окружающей среды, отрицательно влияющих на здоровье человека;
- ослабление действия этих факторов до безопасных пределов или исключение их если это возможно;
- ликвидация последствий катастроф и стихийных бедствий.

Круг практических задач БЖД прежде всего обусловлен выбором принципов защиты, разработкой и рациональным использованием средств защиты человека и природной среды от воздействия техногенных источников и стихийных явлений, а также средств, обеспечивающих комфортное состояние среды жизнедеятельности.

Охрана здоровья трудящихся, обеспечение безопасности условий труда, ликвидация профессиональных заболеваний и производственного травматизма составляет одну из главных забот человеческого общества. Обращается внимание на необходимость широкого применения прогрессивныхформ

научной организации труда, сведения к минимуму ручного, малоквалифицированного труда, создания обстановки, исключающей профессиональные заболевания и производственный травматизм.На рабочем месте должны быть предусмотрены меры защиты от возможного воздействия опасных и вредных факторов производства. Уровни этих факторов не должны превышать предельных значений, оговоренных правовыми, техническими и санитарно-техническими нормами. Эти нормативные документы обязывают к созданию на рабочем месте условий труда, при которых влияние опасных и вредных факторов на работающих либо устранено совсем, либо находится в допустимых пределах.

Данный раздел дипломного проекта посвящен рассмотрению следующих вопросов:

- определение оптимальных условий труда инженера - программиста;
- расчет освещенности;
- расчет уровня шума.

Научно-технический прогресс внес серьезные изменения в условия производственной деятельности работников умственного труда. Их труд стал более интенсивным, напряженным, требующим значительных затрат умственной, эмоциональной и физической энергии. Это потребовало комплексного решения проблем эргономики, гигиены и организации труда, регламентации режимов труда и отдыха.

В настоящее время компьютерная техника широко применяется во всех областях деятельности человека. При работе с компьютером человек подвергается воздействию ряда опасных и вредных производственных факторов: электромагнитных полей (диапазон радиочастот:ВЧ, УВЧ и СВЧ), инфракрасного и ионизирующего излучений, шума и вибрации, статического электричества.

Работа с компьютером характеризуется значительным умственным напряжением и нервно-эмоциональной нагрузкой операторов, высокой напряженностью зрительной работы и достаточно большой нагрузкой на

мышцы рук при работе с клавиатурой ЭВМ. Большое значение имеет рациональная конструкция и расположение элементов рабочего места, что важно для поддержания оптимальной рабочей позы человека-оператора.

В процессе работы с компьютером необходимо соблюдать правильный режим труда и отдыха. В противном случае у персонала отмечаются значительное напряжение зрительного аппарата с появлением жалоб на неудовлетворенность работой, головные боли, раздражительность, нарушение сна, усталость и болезненные ощущения в глазах, в пояснице, в области шеи и руках.

Окраска помещений и мебели должна способствовать созданию благоприятных условий для зрительного восприятия, хорошего настроения.

Источники света, такие как светильники и окна, которые дают отражение от поверхности экрана, значительно ухудшают точность знаков и влекут за собой помехи физиологического характера, которые могут выразиться в значительном напряжении, особенно при продолжительной работе. Отражение, включая отражения от вторичных источников света, должно быть сведено к минимуму. Для защиты от избыточной яркости окон могут быть применены шторы и экраны.

В зависимости от ориентации окон рекомендуется следующая окраска стен и пола:

– окна ориентированы на юг: - стены зеленовато-голубого или светло-голубого цвета; пол - зеленый;

– окна ориентированы на север:- стены светло-оранжевого или оранжево-желтого цвета; пол - красновато-оранжевый;

– окна ориентированы на восток:- стены желто-зеленого цвета;

– пол зеленый или красновато-оранжевый;

– окна ориентированы на запад: - стены желто-зеленого или голубовато-зеленого цвета; пол зеленый или красновато-оранжевый.

В помещениях, где находится компьютер, необходимо обеспечить следующие величины коэффициента отражения: для потолка: 60…70%, для

стен: 40…50%, для пола: около 30%. Для других поверхностей и рабочей мебели: 30…40%.

Правильно спроектированное и выполненное производственное освещение улучшает условия зрительной работы, снижает утомляемость, способствует повышению производительности труда, благотворно влияет на производственную среду, оказывая положительное психологическое воздействие наработающего, повышает безопасность труда иснижает травматизм.

Недостаточность освещения приводит к напряжению зрения, ослабляет внимание, приводит к наступлению преждевременной утомленности. Чрезмерно яркое освещение вызывает ослепление, раздражение и резь в глазах. Неправильное направление света на рабочем месте может создавать резкие тени, блики, дезориентировать работающего. Все эти причины могут привести к несчастному случаю или профзаболеваниям, поэтому столь важен правильный расчет освещенности.

Существует три вида освещения - естественное, искусственное и совмещенное (естественное и искусственное вместе).

Естественное освещение - освещение помещений дневным светом, проникающим через световые проемы в наружных ограждающих конструкциях помещений. Естественное освещение характеризуется тем, что меняется в широких пределах в зависимости от времени дня, времени года, характера области и ряда других факторов.

Искусственное освещение применяется при работе в темное время суток и днем, когда не удается обеспечить нормированные значения коэффициента естественного освещения (пасмурная погода, короткий световой день). Освещение, при котором недостаточное по нормам естественное освещение дополняется искусственным, называется совмещенным освещением.

Искусственное освещение подразделяется на рабочее, аварийное, эвакуационное, охранное. Рабочее освещение, в свою очередь, может быть общим или комбинированным. Общее - освещение, при котором светильники

размещаются в верхней зоне помещения равномерно или применительно к расположению оборудования. Комбинированное - освещение, при котором к общему добавляется местное освещение.

Согласно СНиП II-4-79 впомещений вычислительных центров необходимо применить систему комбинированного освещения.

При выполнении работ категории высокой зрительной точности (наименьший размер объекта различения 0,3…0,5 мм) величина коэффициента естественного освещения (КЕО) должна быть не ниже 1,5%, а при зрительной работе средней точности (наименьший размер объекта различения 0,5…1,0мм)КЕО должен быть не ниже 1,0%. В качестве источников искусственного освещения обычно используются люминесцентные лампы типа ЛБ или ДРЛ, которые попарно объединяются в светильники, которые должны располагаться над рабочими поверхностями равномерно.

Требования к освещенности в помещениях, где установлены компьютеры, следующие: при выполнении зрительныхработ высокой точности общая освещенность должна составлять 300 лк, а комбинированная - 750 лк; аналогичные требования при выполнении работ средней точности - 200 и 300 лк соответственно.

Крометого все поле зрения должно быть освещено достаточно равномерно – это основное гигиеническое требование. Иными словами, степень освещения помещения и яркость экрана компьютера должны быть примерно одинаковыми, т.к. яркий свет в районе периферийного зрения значительно увеличивает напряженность глаз и, как следствие, приводит к их быстрой утомляемости.

Параметры микроклимата могут меняться в широких пределах, в то время как необходимым условием жизнедеятельности человека является поддержание постоянства температуры тела благодаря терморегуляции, т.е. способности организма регулировать отдачу тепла в окружающую среду. Принцип нормирования микроклимата – создание оптимальных условий для теплообмена тела человека с окружающей средой.

Вычислительная техника является источником существенных тепловыделений, что может привести к повышению температуры и снижению относительной влажности в помещении. В помещениях, где установлены компьютеры, должны соблюдаться определенные параметры микроклимата. В санитарных нормах СН-245-71 установлены величины параметров микроклимата, создающие комфортные условия. Эти нормы устанавливаются в зависимости от времени года, характера трудового процесса и характера производственного помещения (см. таблицу 1).

Объем помещений, в которых размещены работники вычислительных центров, не должен быть меньше 19,5 $м^3$/человека с учетом максимального числа одновременно работающих всмену. Нормы подачи свежего воздуха в помещения, где расположены компьютеры, приведены в таблица 2.

Таблица 1 - Параметры микроклимата для помещений, где установлены компьютеры

Период года	Параметр микроклимата	Величина
Холодный	Температура воздуха в помещении Относительная влажность Скорость движения воздуха	22…24 °С 40…60 % до 0,1 м/с
Теплый	Температура воздуха в помещении Относительная влажность Скорость движения воздуха	23…25 °С 40…60 % 0,1…0,2 м/с

Таблица 2- Нормы подачи свежего воздуха в помещения, где расположены компьютеры

Характеристика помещения	Объемный расход подаваемого в помещение свежего воздуха, $м^3$ /на
Объем до 20 $м^3$ на человека 20…40 $м^3$ на человека Более 40 $м^3$ на человека	Не менее 30 Не менее 20 Естественная вентиляция

Для обеспечения комфортных условий используются как организационные методы (рациональная организация проведения работ в зависимости от времени года и суток, чередование труда и отдыха), так и технические средства (вентиляция, кондиционирование воздуха, отопительная система).

Шум ухудшает условия труда оказывая вредное действие на организм человека. Работающие в условиях длительного шумового воздействия испытывают раздражительность, головные боли, головокружение, снижение памяти, повышенную утомляемость, понижение аппетита, боли в ушах и т. д. Такие нарушения в работе ряда органов и систем организма человека могут вызвать негативные изменения в эмоциональном состоянии человека вплоть до стрессовых. Под воздействием шума снижается концентрация внимания, нарушаются физиологические функции, появляется усталость в связи с повышенными энергетическими затратами и нервно-психическим напряжением, ухудшается речевая коммутация. Все это снижает работоспособность человека и его производительность, качество и безопасность труда. Длительное воздействие интенсивного шума [выше 80 дБ(А)] на слух человека приводит к его частичной или полной потере.

В таблице 3 указаны предельные уровни звука в зависимости от категории тяжести и напряженности труда, являющиеся безопасными в отношении сохранения здоровья и работоспособности.

Таблица 3- Предельные уровни звука, дБ, на рабочих местах.

Категория напряженности труда	Категория тяжести труда			
	I. Легкая	II. Средняя	III. Тяжелая	IV. Очень тяжелая
I. Мало напряженный	80	80	75	75
II. Умеренно напряженный	70	70	65	65
III. Напряженный	60	60	-	-
IV. Очень напряженный	50	50	-	-

Уровень шума на рабочем месте математиков-программистов и операторов видеоматериалов не должен превышать 50 дБА, а в залах обработки информации на вычислительных машинах - 65 дБА. Для снижения уровня шума стены и потолок помещений, где установлены компьютеры, могут быть облицованы звукопоглощающими материалами. Уровень вибрации в помещениях вычислительных центров может быть снижен путем установки оборудования на специальные виброизоляторы.

Большинство ученых считают, что как кратковременное, так и длительное воздействие всех видов излучения от экрана монитора не опасно для здоровья персонала, обслуживающего компьютеры. Однако исчерпывающих данных относительно опасности воздействия излучения от мониторов на работающих с компьютерами не существует и исследования в этом направлении продолжаются.

Допустимые значения параметров неионизирующих электромагнитных излучений от монитора компьютера представлены в таблице 4.

Максимальный уровень рентгеновского излучения на рабочем месте оператора компьютера обычно не превышает 10 мкбэр/ч, а интенсивность ультрафиолетового и инфракрасного излучений от экрана монитора лежит в пределах 10…100 мВт/м^2.

Таблица4 -Допустимые значения параметров неионизирующих электро-магнитных излучений (в соответствии с СанПиН 2.2.2.542-96)

Наименование параметра	Допустимые
Напряженность электрической составляющей электромагнитного поля на расстоянии 50 см от поверхности видеомонитора	10 В/м
Напряженность магнитной составляющей электромагнитного поля на расстоянии 50 см от поверхности видеомонитора	0,3 А/м
Напряженность электростатического поля не должна превышать: для взрослых пользователей для детей дошкольных учреждений и учащихся средних специальных и высших учебных заведений	 20 кВ/м 15 кВ/м

Для снижения воздействия этих видов излучения рекомендуется применять мониторы с пониженным уровнем излучения (MPR-II, TCO-92, TCO-99), устанавливать защитные экраны, а также соблюдать регламентированные режимы труда и отдыха.

Проектирование рабочих мест, снабженных видеотерминалами, относится к числу важных проблем эргономического проектирования в области вычислительной техники.

Рабочее место и взаимное расположение всех его элементов должно соответствовать антропометрическим, физическим и психологическим требованиям. Большое значение имеет также характер работы. В частности, при организации рабочего места программиста должны быть соблюдены следующие основные условия: оптимальное размещение оборудования, входящего в состав рабочего места и достаточное рабочее пространство, позволяющее осуществлять все необходимые движения и перемещения.

Эргономическими аспектами проектирования видеотерминальных рабочих мест, в частности, являются: высота рабочей поверхности, размеры пространства для ног, требования к расположению документов на рабочем месте (наличие и размеры подставки для документов, возможность различного размещения документов, расстояние от глаз пользователя до экрана, документа, клавиатуры и т.д.), характеристики рабочего кресла, требования к поверхности рабочего стола, регулируемость элементов рабочего места.

Главными элементами рабочего места программиста являются стол и кресло. Основным рабочим положением является положение сидя.

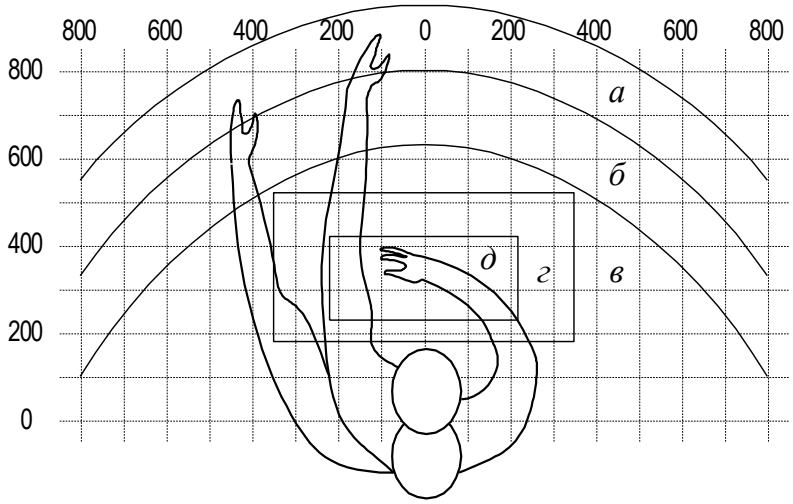
Рабочая поза сидя вызывает минимальное утомление программиста. Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще, расположено в зоне легкой досягаемости рабочего пространства.

Моторное поле - пространство рабочего места, в котором могут осуществляться двигательные действия человека. На рис.2 показан пример.

Максимальная зона досягаемости рук- это часть моторного поля рабочего места, ограниченного дугами, описываемыми максимально вытянутыми руками при движении их в плечевом суставе.

Оптимальная зона - часть моторного поля рабочего места, ограниченного дугами, описываемыми предплечьями при движении в локтевых суставах с опорой в точке локтя и с относительно неподвижным плечом.

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости:



а - зона максимальной досягаемости;

б - зона досягаемости пальцев при вытянутой руке;

в - зона легкой досягаемости ладони;

г - оптимальное пространство для грубой ручной работы;

д - оптимальное пространство для тонкой ручной работы.

Рисунок 2- Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости

ДИСПЛЕЙ размещается в зоне а(в центре);

СИСТЕМНЫЙ БЛОК размещается в предусмотренной нише стола;

КЛАВИАТУРА - в зоне г/д;

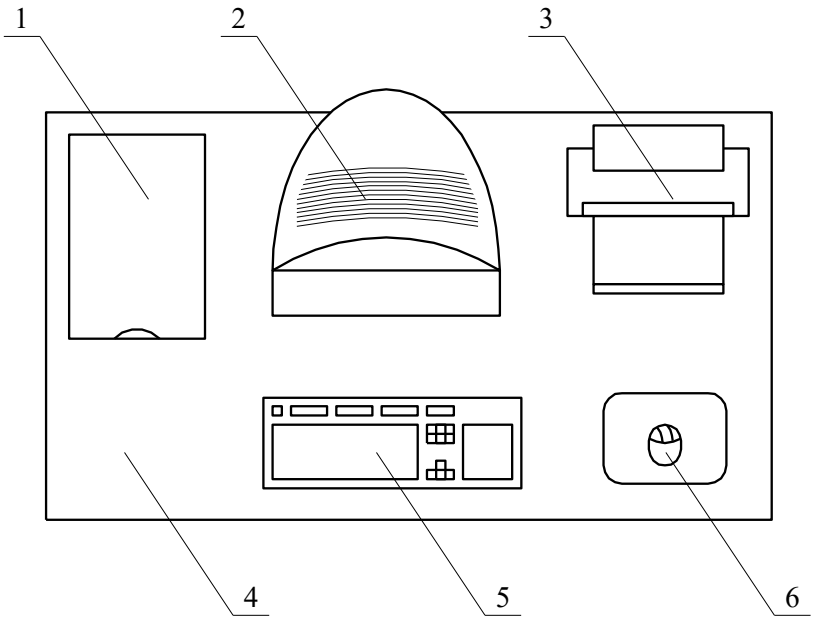
«МЫШЬ» - в зоне в справа;

СКАНЕР в зоне а/б (слева);

ПРИНТЕР находится в зоне а (справа);

ДОКУМЕНТАЦИЯ: необходимая при работе - в зоне легкой досягаемости ладони – в, а в выдвижных ящиках стола - литература, неиспользуемая постоянно.

На рис. 3 показан пример размещения основных и периферийных составляющих ПК на рабочем столе программиста.



1 – сканер, 2 – монитор, 3 – принтер, 4 – поверхность рабочего стола,

5 – клавиатура, 6 – манипулятор типа «мышь».

РисунокЗ- Размещение основных и периферийных составляющих

Для комфортной работы стол должен удовлетворять следующим условиям:

- высота стола должна быть выбрана с учетом возможности сидеть свободно, в удобной позе, при необходимости опираясь на подлокотники;
- нижняя часть стола должна быть сконструирована так, чтобы программист мог удобно сидеть, не был вынужден поджимать ноги;
- поверхность стола должна обладать свойствами, исключающими появление бликов в поле зрения программиста;

- конструкция стола должна предусматривать наличие выдвижных ящиков (не менее 3 для хранения документации, листингов, канцелярских принадлежностей).

- высота рабочей поверхности рекомендуется в пределах 680-760 мм. Высота поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть около 650 мм.

Большое значение придается характеристикам рабочего кресла. Так, рекомендуемая высота сиденья над уровнем пола находится в пределах 420-550 мм. Поверхность сиденья мягкая, передний край закругленный, а угол наклона спинки - регулируемый.

Необходимо предусматривать при проектировании возможность различного размещения документов: сбоку от видеотерминала, между монитором и клавиатурой и т.п. Кроме того, в случаях, когда видеотерминал имеет низкое качество изображения, например заметны мелькания, расстояние от глаз до экрана делают больше (около 700 мм), чем расстояние от глаза до документа (300-450 мм). Вообще при высоком качестве изображения на видеотерминале расстояние от глаз пользователя до экрана, документа и клавиатуры может быть равным.

Положение экрана определяется:

- расстоянием считывания (0,6…0,7 м);

- углом считывания, направлением взгляда на 20° ниже горизонтали к центру экрана, причем экран перпендикулярен этому направлению.

Должна также предусматриваться возможность регулирования экрана:

- по высоте +3 см;

- по наклону от -10° до +20° относительно вертикали;

- в левом и правом направлениях.

Большое значение также придается правильной рабочей позе пользователя. При неудобной рабочей позе могут появиться боли в мышцах, суставах и сухожилиях. Требования к рабочей позе пользователя видеотерминала следующие:

- голова не должна быть наклонена более чем на 20°,
- плечи должны быть расслаблены,
- локти - под углом 80°…100°,
- предплечья и кисти рук - в горизонтальном положении.

Причина неправильной позы пользователей обусловлена следующими факторами: нет хорошей подставки для документов, клавиатура находится слишком высоко, а документы - низко, некуда положить руки и кисти, недостаточно пространство для ног.

В целях преодоления указанных недостатков даются общие рекомендации: лучше передвижная клавиатура; должны быть предусмотрены специальные приспособления для регулирования высоты стола, клавиатуры и экрана, а также подставка для рук.

Существенное значение для производительной и качественной работы на компьютере имеют размеры знаков, плотность их размещения, контраст и соотношение яркостей символов и фона экрана. Если расстояние от глаз оператора до экрана дисплея составляет 60…80 см, то высота знака должна быть не менее 3 мм, оптимальное соотношение ширины и высоты знака составляет 3:4, а расстояние между знаками – 15…20% их высоты. Соотношение яркости фона экрана и символов - от 1:2 до 1:15.

Во время пользования компьютером медики советуют устанавливать монитор на расстоянии 50-60 см от глаз. Специалисты также считают, что верхняя часть видеодисплея должна быть на уровне глаз или чуть ниже. Когда человек смотрит прямо перед собой, его глаза открываются шире, чем когда он смотрит вниз. За счет этого площадь обзора значительно увеличивается, вызывая обезвоживание глаз. К тому же если экран установлен высоко, а глаза широко открыты, нарушается функция моргания. Это значит, что глаза не закрываются полностью, не омываются слезной жидкостью, не получают достаточного увлажнения, что приводит к их быстрой утомляемости.

Создание благоприятных условий труда и правильное эстетическое оформление рабочих мест на производстве имеет большое значение как для

облегчения труда, так и для повышения его привлекательности, положительно влияющей на производительность труда.

Как уже было неоднократно отмечено, при работе с персональным компьютером очень важную роль играет соблюдение правильного режима труда и отдыха. В противном случае у персонала отмечаются значительное напряжение зрительного аппарата с появлением жалоб на неудовлетворенность работой, головные боли, раздражительность, нарушение сна, усталость и болезненные ощущения в глазах, в пояснице, в области шеи и руках.

В таблице 5 представлены сведения о регламентированных перерывах, которые необходимо делать при работе на компьютере, в зависимости от продолжительности рабочей смены, видов и категорий трудовой деятельности с ВДТ (видеодисплейный терминал) и ПЭВМ (в соответствии с СанПиН 2.2.2 542-96 «Гигиенические требования к видеодисплейным терминалам, персональным электронно-вычислительным машинам и организации работ»).

Таблица 5 - Время регламентированных перерывов при работе на компьютере

Категория работы с ВДТ или ПЭВМ	Уровень нагрузки за рабочую смену при видах работы с ВДТ			Суммарное время регламентированных	
	Группа А, количество знаков	Группа Б, количество знаков	Группа В, часов	При 8-часовой смене	При 12-часовой смене
I	до 20 000	до 15 000	до 2,0	30	70
II	до 40 000	до 30 000	до 4,0	50	90
III	до 60 000	до 40 000	до 6,0	70	120

Примечание. Время перерывов дано при соблюдении указанных Санитарных правил и норм. При несоответствии фактических условий труда требованиям Санитарных правил и норм время регламентированных перерывов следует увеличить на 30%.

В соответствии со СанПиН 2.2.2 546-96 все виды трудовой деятельности, связанные с использованием компьютера, разделяются на три группы:

группа А: работа по считыванию информации с экрана ВДТ или ПЭВМ с предварительным запросом;

группа Б: работа по вводу информации;

группа В: творческая работа в режиме диалога с ЭВМ.

Эффективность перерывов повышается при сочетании с производственной гимнастикой или организации специального помещения для отдыха персонала с удобной мягкой мебелью, аквариумом, зеленой зоной и т.п.

Расчет освещенности рабочего места сводится к выбору системы освещения, определению необходимого числа светильников, их типа и размещения. Исходя из этого, рассчитаем параметры искусственного освещения.

Обычно искусственное освещение выполняется посредством электрических источников света двух видов: ламп накаливания и люминесцентных ламп. Будем использовать люминесцентные лампы, которые по сравнению с лампами накаливания имеют ряд существенных преимуществ:

- по спектральному составу света они близки к дневному, естественному свету;
- обладают более высоким КПД (в 1,5-2раза выше, чем КПД ламп накаливания);
- обладают повышенной светоотдачей (в 3-4 раза выше, чем у ламп накаливания);
- более длительный срок службы.

Расчет освещения производится для комнаты площадью $15\,м^2$, ширина которой $5\,м$, высота - 3 м. Воспользуемся методом светового потока.

Для определения количества светильников определим световой поток, падающий на поверхность по формуле:

$$F = \frac{E \cdot K \cdot S \cdot Z}{n} \qquad (3.1)$$

где F - рассчитываемый световой поток, Лм;

E - нормированная минимальная освещенность, Лк (определяется по таблице).

Работу программиста, в соответствии с этой таблицей, можно отнести к разряду точных работ, следовательно, минимальная освещенность будет *E* = 300 Лк; *S* - площадь освещаемого помещения (в нашем случае *S* = 15 м^2);

Z - отношение средней освещенности к минимальной (обычно принимается равным 1,1…1,2 , пусть *Z* = 1,1);

K - коэффициент запаса, учитывающий уменьшение светового потока лампы в результате загрязнения светильников в процессе эксплуатации (его значение зависит от типа помещения и характера проводимых в нем работ и в нашем случае*K*= 1,5);

n - коэффициент использования, (выражается отношением светового потока, падающего на расчетную поверхность, к суммарному потоку всех ламп и исчисляется в долях единицы; зависит от характеристик светильника, размеров помещения, окраски стен и потолка, характеризуемых коэффициентами отражения от стен ($P_С$) и потолка ($P_П$)), значение коэффициентов $P_С$ и $P_П$ были указаны выше: $P_С = 40\%$, $P_П = 60\%$. Значение *n* определим по таблице коэффициентов использования различных светильников. Для этого вычислим индекс помещения по формуле:

$$I = \frac{S}{h \cdot (A + B)} \tag{3.2}$$

где *S* - площадь помещения, *S* = 15 м^2;

h - расчетная высота подвеса, *h* = 2.92 м;

A - ширина помещения, *A* = 3 м;

B - длина помещения, *B* = 5 м.

Подставив значения получим:

$$I = \frac{15}{2{,}92 \cdot (3 + 5)} = 0{,}64 \tag{3.3}$$

Зная индекс помещения *I*, по таблице 7 [23] находим *n* = 0,22

Подставим все значения в формулу для определения светового потока *F*:

$$F = \frac{300 \cdot 1{,}5 \cdot 15 \cdot 1{,}1}{0{,}22} = 33750 Лм (3.4)$$

Для освещения выбираем люминесцентные лампы типа ЛБ40-1, световой поток которых *F* = 4320 Лк.

Рассчитаем необходимое количество ламп по формуле:

$$N = \frac{F}{F_л} \qquad (3.5)$$

N - определяемое число ламп;

F - световой поток, F = 33750 Лм;

$F_л$- световой поток лампы, $F_л$ = 4320 Лм.

$$N = \frac{33750}{4320} = 8\ шт. \qquad (3.6)$$

При выборе осветительных приборов используем светильники типа ОД. Каждый светильник комплектуется двумя лампами.

Одним из неблагоприятных факторов производственной среды в ИВЦ является высокий уровень шума, создаваемый печатными устройствами, оборудованием для кондиционирования воздуха, вентиляторами систем охлаждения в самих ЭВМ.

Для решения вопросов о необходимости и целесообразности снижения шума необходимо знать уровни шума на рабочем месте оператора.

Уровень шума, возникающий от нескольких некогерентных источников, работающих одновременно, подсчитывается на основании принципа энергетического суммирования излучений отдельных источников:

$$L_\Sigma = 10\,lg \sum_{i=1}^{i=n} 10^{0,1L_i} \qquad (3.7)$$

где L_i – уровень звукового давления *i*-го источника шума;

n – количество источников шума.

Полученные результаты расчета сравнивается с допустимым значением уровня шума для данного рабочего места. Если результаты расчета выше допустимого значения уровня шума, то необходимы специальные меры по снижению шума. К ним относятся: облицовка стен и потолка зала звукопоглощающими материалами, снижение шума в источнике, правильная планировка оборудования и рациональная организация рабочего места оператора.

Уровни звукового давления источников шума, действующих на оператора на его рабочем месте представлены в таблице 6.

Обычно рабочее место оператора оснащено следующим оборудованием: винчестер в системном блоке, вентилятор(ы) систем охлаждения ПК, монитор, клавиатура, принтер и сканер.

Таблица 6 - Уровни звукового давления различных источников.

Источник шума	Уровень шума, дБ
Жесткий диск	40
Вентилятор	45
Монитор	17
Клавиатура	10
Принтер	45
Сканер	42

Подставив значения уровня звукового давления для каждого вида оборудования в формулу , получим:

$$L_{\Sigma} = 10 \cdot \lg (10^{4} + 10^{4,5} + 10^{1,7} + 10^{1} + 10^{4,5} + 10^{4,2}) = 49,5 \text{ Дб} \quad (3.8)$$

Полученное значение не превышает допустимый уровень шума для рабочего места оператора, равный 65 дБ (ГОСТ 12.1.003-83). И если учесть, что вряд ли такие периферийные устройства как сканер и принтер будут использоваться одновременно, то эта цифра будет еще ниже. Кроме того при работе принтера непосредственное присутствие оператора необязательно, т.к. принтер снабжен механизмом автоподачи листов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Будущее интегральныхконденсаторов тесно связано с развитием новых технологических процессов и материалов, а также с концепциями "*MorethanMoore*" и *3D*-интеграции, которые позволяют создавать более мощные компоненты с новыми функциональными возможностями. С развитием Интернета интегральные конденсаторы находят применение в компактных и энергоэффективных устройствах, таких как сенсоры и носимые гаджеты, где их миниатюризация и надежность являются ключевыми факторами. Постоянное совершенствование их характеристик будет способствовать дальнейшему прогрессу в области микроэлектроники, открывая новые возможности для создания еще более мощных, компактных и энергоэффективных электронных систем в различных областях, от потребительской электроники до автомобильной промышленности и медицины [23].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Electropages. The Future of Semiconductor Technology: Key Challenges & Trends. URL: https://www.electropages.com/blog/2025/02/future-semiconductor-technology-challenges-and-innovations*(датаобращения: 03.06.2025)

2. *Microchip USA. The Ultimate Guide to Capacitors: Everything You Need to Know. URL: https://www.microchipusa.com/electrical-components/the-ultimate-guide-to-capacitors-everything-you-need-to-know*(дата обращения: 03.06.2025)

3. *electronicsbuzz.in. The Essential Role of Capacitors in Modern Electronics. URL: https://electronicsbuzz.in/the-essential-role-of-capacitors-in-modern-electronics/*(дата обращения: 03.06.2025)

4. *componentscse.com. Miniaturization of capacitors - A Trend Towards Miniaturized Electronics (Small Wonder).URL: https://componentscse.com/blog/miniaturisation-of-capacitor-parts*(датаобращения: 03.06.2025)

5. *Monolithic Power Systems. Revolutionizing Power Supplies: The Advantages of Integrated Power Modules. URL: http://www.monolithicpower.com/learning/resources/revolutionizing-power-supples-the-advantages-of-integrated-power-modules*(дата обращения: 03.06.2025)

6. *IPC. Decoupling with Integrated Capacitors. URL: https://www.ipc.org/system/files/technical_resource/E32%26S05-2.pdf*(дата обращения: 03.06.2025)

7. *Sze, S. M., Ng, K. K. Physics of Semiconductor Devices. – John Wiley & Sons, 2007*(датаобращения: 03.06.2025)

8. *Baker, R. J. CMOS: Circuit Design, Layout, and Simulation. – Wiley-IEEE Press, 2010*(датаобращения: 03.06.2025)

9. *ResearchGate. Challenges for dielectric materials in future integrated circuit technologies. URL: https://www.researchgate.net/publication/220456649_Challenges_for_dielectri*

c_materials_in_future_integrated_circuit_technologies(дата обращения: 03.06.2025)

10. World Scientific. Issues, achievements and challenges towards integration of high-k dielectrics. URL: https://www.worldscientific.com/doi/pdf/10.1142/S0129156402001253(дата обращения: 03.06.2025)

11. Evident Scientific. Metal Oxide Semiconductor (MOS) Capacitor. URL: https://evidentscientific.com/en/microscope-resource/knowledge-hub/digital-imaging/concepts/moscapacitor(дата обращения: 03.06.2025)

*12. Tektronix. *C-V Characterization of MOS Capacitors Using the 4200A-SCS Parameter Analyzer*. URL: https://download.tek.com/document/1KW-60645-0_C-V_Characterization_MOS_Capacitors_4200A-SCS_Application_Note_040320.pdf*(дата обращения: 03.06.2025)

13. Sutor, X. MOS Capacitors Used in Mixed-Signal Circuits and Their Operative Range. EEICT. URL: https://www.fekt.vut.cz/conf/EEICT/archiv/sborniky/EEICT_2004_sbornik/03-Doktorske_proekty/06-Mikroelektronika_a_technologie/30-xsutor00.pdf(дата обращения: 03.06.2025)

14. Razavi, B. Design of Analog CMOS Integrated Circuits. – McGraw-Hill Education, 2001(датаобращения: 03.06.2025)

15. *Титце,* У., Шенк, К. Полупроводниковая схемотехника. – М.: Додэка, 2007. – 1408 с(дата обращения: 03.06.2025)

16. Ansys. The Difference Between MOM, MIM, and MOS Capacitors. URL: https://www.ansys.com/blog/difference-between-mom-MIM-mos-capacitor(дата обращения: 03.06.2025)

17. Anypcba. Understanding the Role of MOSFET Capacitors in Circuit Design.URL: https://www.anypcba.com/blogs/electronic-component-knowledge/understanding-the-role-of-mosfet-capacitors-in-circuit-design.html(датаобращения: 03.06.2025)

18. Березин, А. В. Основы микроэлектроники. – М.: Техносфера, 2008. – 256 с. (дата обращения: 03.06.2025)

19. Ким, А. С., Ли, И. Г. Основы проектирования интегральных схем. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 180 с.(дата обращения: 03.06.2025)

20. Разевиг, В. Д. Система схемотехнического моделирования OrCAD. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 400 с.(дата обращения: 03.06.2025)

21. Зи, С. М. Физика полупроводниковых приборов. – М.: Мир, 1984. – 456 с.(дата обращения: 03.06.2025)

22. Usha Power. The Role of Capacitors in Modern Technology. URL: https://ushapower.com/blog/the-role-of-capacitors-in-modern-technology/(дата обращения: 03.06.2025)

23. VOLTAGE. Интегральные *Микросхемы и их влияние на современное общество. URL: https://voltage.pw/integralnye-mikroshemy-i-ih-vliyanie-na-sovremennoe-obshhestvo/*(дата обращения: 03.06.2025)

24. https://www.bibliofond.ru/view.aspx?id=51350#text(дата обращения: 03.06.2025)

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

Задание на выпускную квалификационную работу

«Утверждаю»
Зав. кафедрой НиМЭ
Пронин И.А.
(фамилия, инициалы)
«»июня 2025 г.

З А Д А Н И Е
на бакалаврскую работу

1. Студент(ка) гр. 21ПД1 факультета информационных технологий и электроники
Направление подготовки 11.03.04. «Электроника и наноэлектроника»
Профиль Микроэлектроника и твердотельная электроника
Мурашов Максим Андреевич
(фамилия, имя, отчество)

2. Руководитель Аношкин Юрий Владимирович
(фамилия, имя, отчество)

3. Тема бакалаврской работы Конструирование и расчет параметров интегральных конденсаторов
Тема утверждена приказом ПГУ № от

4.Техническое задание на бакалаврскую работу (вид работы: разработка, проектирование, исследование, и т.д.; назначение; основные параметры; условия функционирования и т.д.)
Разработатьпрограммный комплекс для расчета параметров интегральных конденсаторов.
Основные характеристики:
1. Разработку программы выполнить на языке программирования высокого уровня.
2. Исходными данными для расчета интегральных конденсаторов является выбор микроэлектронной структуры *MIM*, *MOS* и *PIP*.
3. Проверку программного комплекса выполнить на основе реальных исходных данных для интегральных конденсаторов.

5. Объем и содержание основной части бакалаврской работы
5.1. Пояснительная записка (перечень вопросов, подлежащихразработке, обоснований, описаний, расчетов и т.д.)
1. Интегральные конденсаторы и их роль в микроэлектронике.
1.1 Конденсаторы на основе «МОП-структур».
1.2 Конденсаторы типа «металл-изолятор-металл».
1.3 Конденсаторы типа «металл-изолятор-поликремний».
1.4 Технологические особенности формирования интегральных конденсаторов.

«Утверждаю»
Зав. кафедрой НиМЭ
Пронин И.А.
(фамилия, инициалы)
«05»июня 2025 г.

З А Д А Н И Е
на бакалаврскую работу

1. Студент(ка) гр. 21ПД1 факультета информационных технологий и электроники
Направление подготовки 11.03.04. «Электроника и наноэлектроника»
Профиль Микроэлектроника и твердотельная электроника
Мурашов Максим Андреевич
(фамилия, имя, отчество)

2. Руководитель Аношкин Юрий Владимирович
(фамилия, имя, отчество)

3. Тема бакалаврской работы Конструирование и расчет параметров интегральных конденсаторов
Тема утверждена приказом ПГУ № от № 582/0 от 25.04.2025 г.

4. Техническое задание на бакалаврскую работу (вид работы: разработка, проектирование, исследование, и т.д.; назначение; основные параметры; условия функционирования и т.д.)
Разработатьпрограммный комплекс для расчета параметров интегральных конденсаторов.
Основные характеристики:
1. Разработку программы выполнить на языке программирования высокого уровня.
2. Исходными данными для расчета интегральных конденсаторов является выбор микроэлектронной структуры *MIM*, *MOS* и *PIP*.
3. Проверку программного комплекса выполнить на основе реальных исходных данных для интегральных конденсаторов.

5. Объем и содержание основной части бакалаврской работы

5.1. Пояснительная записка (перечень вопросов, подлежащихразработке, обоснований, описаний, расчетов и т.д.)
1. Интегральные конденсаторы и их роль в микроэлектронике.
1.1 Конденсаторы на основе «МОП-структур».
1.2 Конденсаторы типа «металл-изолятор-металл».
1.3 Конденсаторы типа «металл-изолятор-поликремний».
1.4 Технологические особенности формирования интегральных конденсаторов.

2. Разработка конструкции интегральных конденсаторов с заданными свойствами

2.1 Назначение программного комплекса расчета параметров интегральных конденсаторов

2.2 Особенности выполнения программы расчета параметров интегральных конденсаторов.

2.3 Выполнение вычислений параметров интегральных конденсаторов.

2.4 Перспективное применение программного комплекса в микроэлектроники.

2.5 Характеристики интегральных конденсаторов на основе выполненных вычислений

3. Организация рабочего места инженера-программиста.

5.2. Иллюстративная часть (перечень и содержание чертежей и слайдов презентации)

1 Цели и задачи выпускной квалификационной работы (слайд 2).

2 Актуальность проведенной работы(слайд 3).

3 Виды рассматриваемых интегральных конденсаторов(слайд 4).

4 Паразитные эффекты(слайд 5).

5 Моделирование и расчет параметров конденсаторов(слайд 6).

6 Результаты исследования(слайд 7).

7 Практическая значимость (слайд 8).

8 Перспективы развития(слайд 9).

9 Выводы по выпускной квалификационной работе (слайд 10).

6. Консультанты и содержание дополнительных разделов

6.1.

Консультант

7. Календарный график по выполнению бакалаврской работы

Наименование этапов работы	Объем работы	Срок выполнения	Подпись руководителя, консультанта
Интегральные конденсаторы и их роль в микроэлектронике	25 %	05.06.2025 г.	
Разработка конструкции интегральных конденсаторов с заданными свойствами	60 %	06.06.2025 г.	
Организация рабочего места инженера-программиста	5 %	08.06.2025 г.	
Подготовка графической части выпускной квалификационной работы	5 %	09.06.2025 г.	
Оформление ПЗ выпускной квалификационной работы	5 %	09.06.2025 г.	

Руководитель бакалаврской работы _____ Аношкин Ю.В.
подпись фамилия, инициалы

Дата выдачи задания «05» июня 2025 г.

Задание к исполнению принял _____ Мурашов М.А.
подпись фамилия, инициалы

«05» июня 2025 г.

Бакалаврскую работу к защите допустить

Декан факультета _____ Кревчик В.Д.
подпись фамилия, инициалы

«19» 06 2025 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

Программа на языке программирования *Python*для расчета параметров конденсатора

```
importmath
fromdataclasses import dataclass
fromenum import Enum, auto

classCapacitorType(Enum):
    """Типыинтегральныхконденсаторов"""
    MIM = auto()           # Metal-Insulator-Metal
MOS = auto()           # Металл-оксид-полупроводник
    PIP = auto()           # Поли-изолятор-поли

@dataclass
classCapacitorParameters:
    """Класс для хранения параметров конденсатора"""
capacitance: float      # Емкость (Ф)
area: float             # Площадь (м²)
thickness: float        # Толщинадиэлектрика (м)
permittivity: float     # Диэлектрическаяпроницаемостьматериала
leakage_current: float  #Токутечки (А)
breakdown_voltage: float # Напряжение пробоя (В)
q_factor: float         # Добротность
esr: float              # Эквивалентное последовательное сопротивление (Ом)

classCapacitorCalculator:
    """Класс для расчета параметров интегральных конденсаторов"""

def __init__(self):
        # Таблица диэлектрических проницаемостей материалов
self.dielectric_materials = {
            'SiO2': {'permittivity': 3.9, 'breakdown_field': 0.5e9},  #В/м
            'Si3N4': {'permittivity': 7.5, 'breakdown_field': 1e9},
            'HfO2': {'permittivity': 25, 'breakdown_field': 0.6e9},
            'Al2O3': {'permittivity': 9, 'breakdown_field': 0.7e9},
            'Ta2O5': {'permittivity': 25, 'breakdown_field': 0.5e9}
}

        # Таблицаудельныхсопротивлений материалов
self.resistivity_materials = {
'Al': 2.65e-8,
            'Cu': 1.68e-8,
            'Au': 2.44e-8,
            'PolySi': 1e-5,
            'TiN': 2e-6,
            'W': 5.6e-8
        }
```

```
        # Параметрыполупроводников
self.semiconductor_params = {
            'Si': {'resistivity': 0.1, 'bandgap': 1.12},  #Ом*м, эВ
            'GaAs': {'resistivity': 1e-3, 'bandgap': 1.42}
        }

defcalculate_mim(self, area: float, thickness: float,
dielectric: str, electrode_material: str,
frequency: float = 1e6) ->CapacitorParameters:
        """
Расчет MIM (Metal-Insulator-Metal) конденсатора

Параметры:
            area: площадь (м²)
thickness: толщина диэлектрика (м)
dielectric: материал диэлектрика
electrode_material: материал электродов
frequency: рабочая частота (Гц)

        Возвращает:
CapacitorParameters: параметрыконденсатора
        """
if dielectric not in self.dielectric_materials:
raiseValueError(f"Неизвестныйматериалдиэлектрика: {dielectric}")

        epsilon_0 = 8.854e-12  #Ф/м
epsilon_r = self.dielectric_materials[dielectric]['permittivity']
breakdown_field = self.dielectric_materials[dielectric]['breakdown_field']

        # Расчетемкости
capacitance = epsilon_0 * epsilon_r * area / thickness

        # Расчетнапряженияпробоя
breakdown_voltage = breakdown_field * thickness

# Расчет тока утечки (упрощенная модель)
leakage_current = area * 1e-12 * math.exp(-thickness * 1e9 / 2)  # пА/мкм²

        # Расчет ESR идобротности
esr = self._calculate_esr(thickness, electrode_material, area, frequency)
q_factor = 1 / (2 * math.pi * frequency * capacitance * esr) if esr> 0 else float('inf')

returnCapacitorParameters(
capacitance=capacitance,
area=area,
```

```
thickness=thickness,
permittivity=epsilon_r,
leakage_current=leakage_current,
breakdown_voltage=breakdown_voltage,
q_factor=q_factor,
esr=esr
        )

defcalculate_mos(self, area: float, oxide_thickness: float,
substrate_material: str, doping_concentration: float,
frequency: float = 1e6) ->CapacitorParameters:
        """
Расчет MOS (Metal-Oxide-Semiconductor) конденсатора

Параметры:
area: площадь (м²)
oxide_thickness: толщинаоксида (м)
substrate_material: материалподложки ('Si', 'GaAs')
doping_concentration: концентрация легирования (см^-3)
frequency: рабочая частота (Гц)

        Возвращает:
CapacitorParameters: параметрыконденсатора
        """
ifsubstrate_material not in self.semiconductor_params:
raiseValueError(f"Неизвестныйматериалподложки: {substrate_material}")

        epsilon_0 = 8.854e-12  #Ф/м
epsilon_ox = self.dielectric_materials['SiO2']['permittivity']
breakdown_field_ox = self.dielectric_materials['SiO2']['breakdown_field']

# Расчет емкости в области сильного накопления
capacitance = epsilon_0 * epsilon_ox * area / oxide_thickness

        # Расчетнапряженияпробояоксида
breakdown_voltage = breakdown_field_ox * oxide_thickness

        # Расчеттокаутечкичерезоксид
leakage_current = area * 1e-10 * math.exp(-oxide_thickness * 1e9 / 2.5)  # пА/мкм²

# Учет емкости обедненной области
epsilon_si = 11.7
debye_length = math.sqrt(epsilon_0 * epsilon_si * 0.0259 /
                         (1.6e-19 * doping_concentration * 1e6))
depletion_capacitance = epsilon_0 * epsilon_si * area / debye_length
```

```
        # Эффективнаяемкость (последовательноесоединение)
effective_capacitance = 1 / (1/capacitance + 1/depletion_capacitance)

# Расчет ESR (учитываем сопротивление подложки)
substrate_resistivity = self.semiconductor_params[substrate_material]['resistivity']
esr = substrate_resistivity * debye_length / area

q_factor = 1 / (2 * math.pi * frequency * effective_capacitance * esr) if esr> 0 else
float('inf')

returnCapacitorParameters(
capacitance=effective_capacitance,
area=area,
thickness=oxide_thickness,
permittivity=epsilon_ox,
leakage_current=leakage_current,
breakdown_voltage=breakdown_voltage,
q_factor=q_factor,
esr=esr
        )

defcalculate_pip(self, area: float, insulator_thickness: float,
dielectric: str, poly_doping: float,
frequency: float = 1e6) ->CapacitorParameters:
        """
Расчет PIP (Poly-Insulator-Poly) конденсатора

Параметры:
area: площадь (м²)
insulator_thickness: толщинаизолятора (м)
dielectric: материал диэлектрика
poly_doping: концентрация легирования поликремния (см^-3)
frequency: рабочая частота (Гц)

        Возвращает:
CapacitorParameters: параметрыконденсатора
        """
if dielectric not in self.dielectric_materials:
raiseValueError(f"Неизвестныйматериалдиэлектрика: {dielectric}")

        epsilon_0 = 8.854e-12  #Ф/м
epsilon_r = self.dielectric_materials[dielectric]['permittivity']
breakdown_field = self.dielectric_materials[dielectric]['breakdown_field']
```

```
        # Расчетемкости
capacitance = epsilon_0 * epsilon_r * area / insulator_thickness

        # Расчетнапряженияпробоя
breakdown_voltage = breakdown_field * insulator_thickness

        # Расчеттокаутечки
leakage_current = area * 1e-11 * math.exp(-insulator_thickness * 1e9 / 3)  # пА/мкм²

# Расчет сопротивления поликремниевых электродов
poly_resistivity = 1 / (1.6e-19 * poly_doping * 1e6 * 1000)  # Упрощенная модель
esr = poly_resistivity * insulator_thickness / area

q_factor = 1 / (2 * math.pi * frequency * capacitance * esr) if esr> 0 else float('inf')

returnCapacitorParameters(
capacitance=capacitance,
area=area,
thickness=insulator_thickness,
permittivity=epsilon_r,
leakage_current=leakage_current,
breakdown_voltage=breakdown_voltage,
q_factor=q_factor,
esr=esr
        )

def _calculate_esr(self, thickness: float, material: str,
area: float, frequency: float) -> float:
"""
        Расчет эквивалентного последовательного сопротивления (ESR)

        Параметры:
thickness: толщина (м)
material: материал электродов
area: площадь (м²)
frequency: частота (Гц)

        Возвращает:
float: значение ESR в Омах
        """
if material not in self.resistivity_materials:
return 0.0

resistivity = self.resistivity_materials[material]
# Упрощенный расчет с учетом скин-эффекта
```

```
skin_depth = math.sqrt(resistivity / (math.pi * frequency * 4e-7 * math.pi))
effective_resistance = resistivity * thickness / (area * skin_depth)

returneffective_resistance

defget_user_input(prompt: str, input_type=float, min_val=None, max_val=None):
"""Функция для безопасного ввода данных от пользователя"""
while True:
try:
value = input_type(input(prompt))
ifmin_val is not None and value <min_val:
print(f"Значение должно быть не меньше {min_val}")
continue
ifmax_val is not None and value >max_val:
print(f"Значение должно быть не больше {max_val}")
continue
return value
exceptValueError:
print("Ошибка: введите корректное значение")

defmain():
calculator = CapacitorCalculator()

print("Программа расчета параметров интегральных конденсаторов")
print("Доступные типы конденсаторов:")
print("1.MIM (Metal-Insulator-Metal)")
print("2. MOS (Metal-Oxide-Semiconductor)")
print("3. PIP (Poly-Insulator-Poly)")

while True:
choice = input("Выберитетипконденсатора (1-3): ")
if choice in ['1', '2', '3']:
break
print("Ошибка: введите число от 1 до 3")

area = get_user_input("Введите площадь конденсатора (мкм²): ", float, 0.1) * 1e-
12
thickness = get_user_input("Введите толщину диэлектрика (нм): ", float, 1) * 1e-9
frequency = get_user_input("Введитерабочуючастоту (МГц): ", float, 0.1) * 1e6

ifchoice == '1':  # MIM
print("\nДоступныематериалыдиэлектрика:")
print(", ".join(calculator.dielectric_materials.keys()))
dielectric = input("Выберите материал диэлектрика: ")
```

```
print("\nДоступныематериалыэлектродов:")
print(", ".join(calculator.resistivity_materials.keys()))
electrode = input("Выберите материал электродов: ")

params = calculator.calculate_mim(
area=area,
thickness=thickness,
dielectric=dielectric,
electrode_material=electrode,
frequency=frequency
        )

elif choice == '2':  # MOS
print("\nДоступныематериалыподложки:")
print(", ".join(calculator.semiconductor_params.keys()))
substrate = input("Выберите материал подложки: ")

doping = get_user_input("Введите концентрацию легирования (см^-3): ", float,
1e10)

params = calculator.calculate_mos(
area=area,
oxide_thickness=thickness,
substrate_material=substrate,
doping_concentration=doping,
frequency=frequency
        )

elifchoice == '3':  # PIP
print("\nДоступныематериалыдиэлектрика:")
print(", ".join(calculator.dielectric_materials.keys()))
dielectric = input("Выберите материал диэлектрика: ")

doping = get_user_input("Введите концентрацию легирования поликремния
(см^-3): ", float, 1e10)

params = calculator.calculate_pip(
area=area,
insulator_thickness=thickness,
dielectric=dielectric,
poly_doping=doping,
frequency=frequency
        )

# Вывод результатов
```

```
print("\nРезультатырасчета:")
print(f"Типконденсатора: {'MIM' if choice == '1' else 'MOS' if choice == '2' else
'PIP'}")
print(f"Емкость: {params.capacitance * 1e12:.2f} пФ")
print(f"Напряжениепробоя: {params.breakdown_voltage:.2f} В")
print(f"Токутечки: {params.leakage_current * 1e12:.2f} пА")
print(f"Добротность: {params.q_factor:.2f}")
print(f"ESR: {params.esr:.2f} Ом")

if __name__ == "__main__":
main()
```

ПРИЛОЖЕНИЕВ

(обязательное)

Заявление и протокол для проверки ВКР на оригинальность

Ректору Пензенского государственного университета Гулякову А.Д.
студента 4 курса ФИТЭ очной формы обучения
Мурашов Максим Андреевич

ЗАЯВЛЕНИЕ

Я, Мурашов Максим Андреевич , студент 4 курса очной формы обучения направления подготовки 11.03.04 Электроника и наноэлектроника, профиль «Микроэлектроника и твердотельная электроника», прошу провести проверку с использованием системы «Антиплагиат.ВУЗ» бакалаврской выпускной классификационной работы на тему «Конструирование и расчет параметров интегральных конденсаторов», выполненной мной самостоятельно, на содержание элементов плагиата.

Все прямые заимствования из печатных и электронных источников, а также из защищенных ранее выпускных квалификационных работ, кандидатских и докторских диссертаций имеют соответствующие ссылки.

Я ознакомлен с действующим стандартом университета «Выпускная квалификационная работа обучающихся по образовательным программам высшего образования - программам бакалавриата, программам специалитета и программам магистратуры», согласно которому обнаружение плагиата является основанием для недопуска ВКР к защите и отчисления из университета.

Подпись студента

ВКР представлена на проверку

Руководитель ВКР Аношкин Ю.В.

Протокол

Проверки на оригинальность в системе «Антиплагиат. ВУЗ»

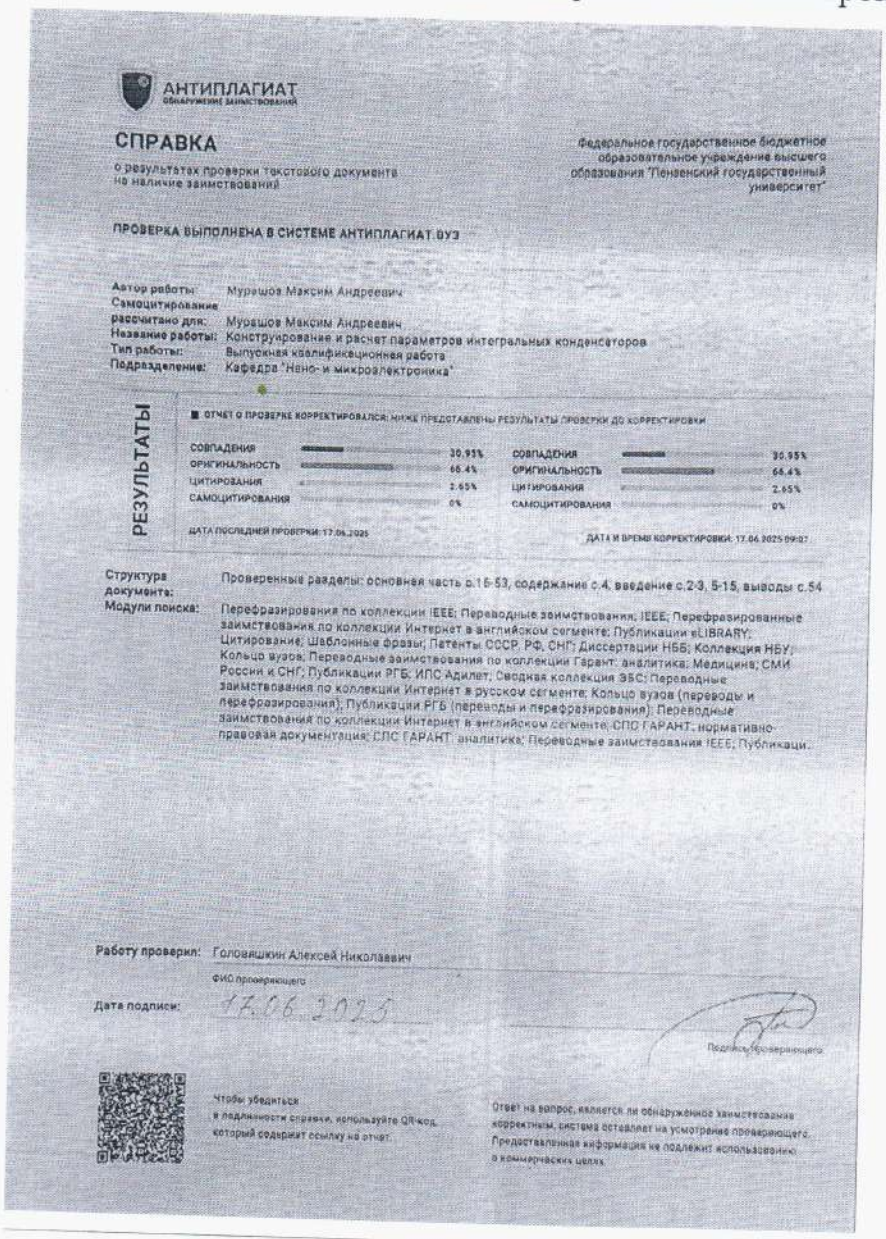
бакалаврской выпускной классификационной работы на тему

«Конструирование и расчет параметров интегральных конденсаторов»

студента 4 курса Мурашов М.А.

направления подготовки 11.03.04 Электроника и наноэлектроника,

профиль «Микроэлектроника и твердотельная электроника»



АНТИПЛАГИАТ
ОБНАРУЖЕНИЕ ЗАИМСТВОВАНИЙ

СПРАВКА

о результатах проверки текстового документа на наличие заимствований

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Пензенский государственный университет"

ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНА В СИСТЕМЕ АНТИПЛАГИАТ.ВУЗ

Автор работы: Мурашов Максим Андреевич
Самоцитирование рассчитано для: Мурашов Максим Андреевич
Название работы: Конструирование и расчет параметров интегральных конденсаторов
Тип работы: Выпускная квалификационная работа
Подразделение: Кафедра "Нано- и микроэлектроника"

РЕЗУЛЬТАТЫ

■ ОТЧЕТ О ПРОВЕРКЕ КОРРЕКТИРОВАЛСЯ; НИЖЕ ПРЕДСТАВЛЕНЫ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕРКИ ДО КОРРЕКТИРОВКИ

СОВПАДЕНИЯ	30.95%	СОВПАДЕНИЯ	30.95%
ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	66.4%	ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	66.4%
ЦИТИРОВАНИЯ	2.65%	ЦИТИРОВАНИЯ	2.65%
САМОЦИТИРОВАНИЯ	0%	САМОЦИТИРОВАНИЯ	0%

ДАТА ПОСЛЕДНЕЙ ПРОВЕРКИ: 17.06.2025
ДАТА И ВРЕМЯ КОРРЕКТИРОВКИ: 17.06.2025 09:02

Структура документа: Проверенные разделы: основная часть с.16-53, содержание с.4, введение с.2-3, 5-15, выводы с.54

Модули поиска: Перефразирования по коллекции IEEE; Переводные заимствования; IEEE; Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте; Публикации eLIBRARY; Цитирование; Шаблонные фразы; Патенты СССР, РФ, СНГ; Диссертации НББ; Коллекция НБУ; Кольцо вузов; Переводные заимствования по коллекции Гарант: аналитика; Медицина; СМИ России и СНГ; Публикации РГБ; ИПС Адилет; Сводная коллекция ЭБС; Переводные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; Кольцо вузов (переводы и перефразирования); Публикации РГБ (переводы и перефразирования); Переводные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте; СПО ГАРАНТ: нормативно-правовая документация; СПС ГАРАНТ: аналитика; Переводные заимствования IEEE; Публикации...

Работу проверил: Головяшкин Алексей Николаевич
ФИО проверяющего
Дата подписи: 17.06.2025
Подпись проверяющего

Чтобы убедиться в подлинности справки, используйте QR-код, который содержит ссылку на отчет.

Ответ на вопрос, является ли обнаруженное заимствование корректным, система оставляет на усмотрение проверяющего. Предоставленная информация не подлежит использованию в коммерческих целях.

Руководитель ВКР

«17»06 2025 год _____ Аношкин Ю.В.

подпись фамилия, инициалы

АНТИПЛАГИАТ
ОБНАРУЖЕНИЕ ЗАИМСТВОВАНИЙ

СПРАВКА

о результатах проверки текстового документа
на наличие заимствований

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Пензенский государственный университет"

ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНА В СИСТЕМЕ АНТИПЛАГИАТ.ВУЗ

Автор работы: Мурашов Максим Андреевич
Самоцитирование рассчитано для: Мурашов Максим Андреевич
Название работы: Конструирование и расчет параметров интегральных конденсаторов
Тип работы: Выпускная квалификационная работа
Подразделение: Кафедра "Нано- и микроэлектроника"

РЕЗУЛЬТАТЫ

■ **ОТЧЕТ О ПРОВЕРКЕ КОРРЕКТИРОВАЛСЯ:** НИЖЕ ПРЕДСТАВЛЕНЫ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕРКИ ДО КОРРЕКТИРОВКИ

СОВПАДЕНИЯ	30.95%	СОВПАДЕНИЯ	30.95%
ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	66.4%	ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	66.4%
ЦИТИРОВАНИЯ	2.65%	ЦИТИРОВАНИЯ	2.65%
САМОЦИТИРОВАНИЯ	0%	САМОЦИТИРОВАНИЯ	0%

ДАТА ПОСЛЕДНЕЙ ПРОВЕРКИ: 17.06.2025

ДАТА И ВРЕМЯ КОРРЕКТИРОВКИ: 17.06.2025 09:07

Структура документа: Проверенные разделы: основная часть с.15-53, содержание с.4, введение с.2-3, 5-15, выводы с.54

Модули поиска: Перефразирования по коллекции IEEE; Переводные заимствования; IEEE; Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте; Публикации eLIBRARY; Цитирование; Шаблонные фразы; Патенты СССР, РФ, СНГ; Диссертации НББ; Коллекция НБУ; Кольцо вузов; Переводные заимствования по коллекции Гарант: аналитика; Медицина; СМИ России и СНГ; Публикации РГБ; ИПС Адилет; Сводная коллекция ЭБС; Переводные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; Кольцо вузов (переводы и перефразирования); Публикации РГБ (переводы и перефразирования); Переводные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте; СПС ГАРАНТ: нормативно-правовая документация; СПС ГАРАНТ: аналитика; Переводные заимствования IEEE; Публикаци...

Работу проверил: Головяшкин Алексей Николаевич

ФИО проверяющего

Дата подписи: 17.06.2025

Подпись проверяющего

Чтобы убедиться в подлинности справки, используйте QR-код, который содержит ссылку на отчет.

Ответ на вопрос, является ли обнаруженное заимствование корректным, система оставляет на усмотрение проверяющего. Предоставленная информация не подлежит использованию в коммерческих целях.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

(обязательное)

Презентация к ВКР

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Факультет информационных технологий и электроники
Кафедра Нано – и микроэлектроника

Конструирование и расчет параметров интегральных конденсаторов

Выполнил студент группы 21ПД1:Мурашов М.А.

Научный руководитель: Аношкин Ю.В.

Цели и задачи выпускной квалификационной работы

Цель: Исследование интегральных конденсаторов и их роли в современной микроэлектронике, а также анализ методов оптимизации их характеристик и минимизации нежелательных эффектов.

Задачи:

Анализ конструкций конденсаторов (МОП, MIM, MIP).

Изучение паразитных эффектов и способов их минимизации.

Разработка программы для расчета параметров конденсаторов.

Оценка перспективных технологий (например, использование новых диэлектриков).

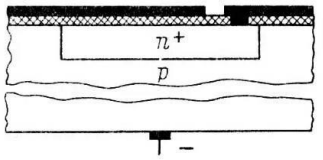
Актуальность проведенной работы

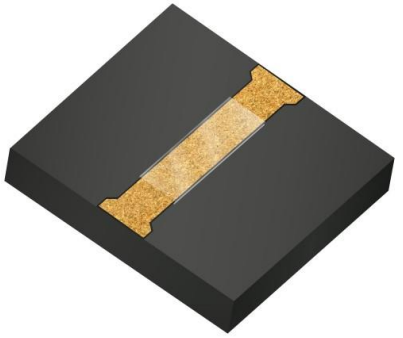
- Интегральные конденсаторы — ключевые компоненты микроэлектронных схем, обеспечивающие фильтрацию шумов, развязку питания и временные задержки. Однако их миниатюризация приводит к росту паразитных эффектов (емкостей, индуктивностей, токов утечки), что снижает производительность устройств. Актуальность работы заключается в разработке методов оптимизации параметров конденсаторов для современных технологий, включая применение *high_k* диэлектриков и 3D-интеграции

Виды рассматриваемых интегральных конденсаторов

- МОП-конденсаторы: Используют структуру металл-оксид-полупроводник. Обладают высокой удельной емкостью, но нелинейной зависимостью от напряжения.
- MIM-конденсаторы: Состоят из двух металлических слоёв с диэлектриком. Отличаются высокой линейностью и добротностью, но сложны в производстве.
- MIP-конденсаторы: Гибридный вариант с поликремниевой обкладкой. Компромисс между стоимостью и характеристиками.

МОП-конденсатор



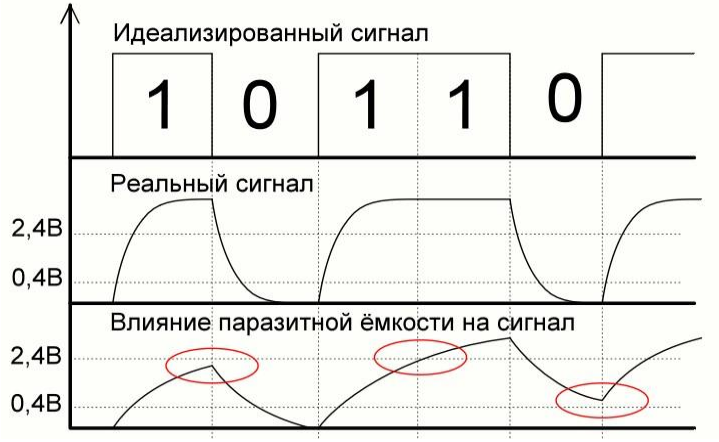


Паразитные эффекты

- Паразитные емкости возникают между проводниками, *p_n_* переходами и подложкой, увеличивая задержки сигналов и энергопотребление.

Методы борьбы:

- Применение *low_k* диэлектриков.
- Оптимизация топологии (увеличение расстояний, экранирование).
- Использование дифференциальных схем для компенсации помех.



Моделирование и расчет параметров конденсаторов

Разработанный программный комплекс на Python позволяет:

- Рассчитывать емкость, ESR, добротность.
- Моделировать частотные характеристики.
- Анализировать влияние паразитных эффектов.
  Пример: Для MIM-конденсатора площадью 1 мкм^2 с диэлектриком SiO_2 программа вычислила емкость ~2 фФ и пробойное напряжение 10 В.

Результаты исследования

- Установлено, что MIM-конденсаторы наиболее подходят для высокочастотных приложений.
- Оптимизация геометрии снижает паразитные эффекты на 20–30%.
- Использование *high_k* материалов (HfO_2) увеличивает удельную емкость в 3–5 раз.

Практическая значимость

Результаты работы могут быть применены:

- В производстве DRAM и аналоговых микросхем.
- Для проектирования энергоэффективных устройств (IoT, 5G-трансиверы).
- В системах с жесткими требованиями к стабильности (медицинская техника).

Перспективы развития

- Внедрение 2D-диэлектриков (например, нитрид бора).
- Развитие 3D-структур для увеличения емкости без роста площади.
- Интеграция алгоритмов машинного обучения для автоматической оптимизации.

Выводы по выпускной квалификационной работе

- Работа подтвердила, что выбор типа конденсатора зависит от применения: MIM — для точных аналоговых схем, МОП — для высокой плотности интеграции. Разработанный инструмент упрощает проектирование, а предложенные методы снижают влияние паразитных эффектов.

Спасибо за внимание!

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ОТЗЫВ
РУКОВОДИТЕЛЯ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Бакалаврская работа на тему: «Конструирование и расчет параметров интегральных конденсаторов»

Выполнена студентом Мурашовым Максимом Андреевичем

Факультет информационных технологий и электроники

Кафедра «Нано- и микроэлектроника» Группа 21 ПД1

Направление подготовки, профиль 11.03.04 «Микроэлектроника и твердотельная электроника»

Квалификация (степень) Бакалавр

Руководитель Аношкин Юрий Владимирович
кандидат технических наук

Качества выпускника, выявленные в ходе выполнения бакалаврской работы:

В ходе выполнения ВКР Мурашов М.А. показал навыки работы с литературными источниками. Продемонстрировал знания и умения работы с языком программирования *python*, и реализовал программу расчета параметров интегральных конденсаторов.

Заключение:

ВКР автора соответствует техническому заданию. Степень соответствия подготовленности выпускника соответствует требованиям к результатам освоения программы бакалавриата ФГОС ВО по направлению подготовки 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника». На основании вышеизложенного считаю, что ВКР заслуживает оценки «**УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО**», а ее автор, Мурашов Максим Андреевич, присвоения степени «**БАКАЛАВР**» по направлению подготовки 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника».

«15» июня 2025 г.

Руководитель _____ Аношкин Ю.В.