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 профиля

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

ПензГУ *02. 11.03.04. 010* ПЗ
обозначение, присваиваемое кафедрой

на тему

Определение и моделирование параметров МДП- транзистора с подзатворным диэлектриком на основе оксида цинка
тема бакалаврской работы

Студент группы 19ПД1 — номер группы — 15.06.23 — подпись, дата — Козин А. С. — фамилия, иниц.

Руководитель доцент — должность — 16.06.23 — подпись, дата — Головяшкин А. Н. — фамилия, иниц.

ПГУ
наименование организации

Нормоконтролер ст. преподаватель — должность — 19.06.23 — подпись, дата — Рыжова Т.Н. — фамилия, иниц.

Работа допущена к защите в ГЭК (протокол заседания кафедры от 15.06.23 № 11)

Заведующий кафедрой 19.06.23 — подпись, дата — Пронин И.А. — фамилия, иниц.

Работа защищена с оценкой отл. (протокол ГЭК от 26.06 № 6)

Секретарь ГЭК 26.06.23 — подпись, дата — Вольсков А.А. — фамилия, иниц.

РЕФЕРАТ

Пояснительная записка состоит из 97 страниц, 36 рисунков, 4 таблиц, списка использованных источников из 58 наименований и 3-х приложений.

Ключевые слова: тонкопленочный транзистор, дисплеи, затвор, оксид цинка, контактная разность потенциалов, пороговое напряжение, передаточные характеристики, поверхностные состояния, емкость МДП-структуры, область пространственного заряда, вольт-фарадная характеристика, поверхностный потенциал.

Цель: исследовать основные параметры и характеристики тонкопленочного транзистора с прозрачным электродом на основе оксида цинка.

Задачи:

1. Произвести анализ литературы про современные тонкопленочные транзисторы: область применения, материалы затвора и подзатворного диэлектрика.

2. Разработать метод, позволяющий рассчитать основные параметры и характеристики тонкопленочных транзисторов

3. Разработать методику измерения параметров, которые невозможно точно вычислить на стадии разработки, а именно: встроенного заряда диэлектрика и заряда поверхностного слоя полупроводника.

Актуальность данной темы заключается в том, что сегодня электроника начинает претерпевать изменения: все больший спрос начинают приобретать приборы, которые могут использоваться в повседневной жизни, такие как медицинские датчики, солнечные батареи, гибкие дисплеи и т. д. Также современные изделия микроэлектронной техники довольно трудоемкий и сложный процесс, вследствие чего цена такого продукта относительно высокая. Переход на тонкопленочные транзисторы приведут к уменьшению себестоимости продуктов электронной техники, так как переход от классической кремниевой технологии на гибкие подложки приведет к тому, что приборы можно будет производить на пластиковой или бумажной ленте, словно печать газет.

Объект исследования: тонкопленочный транзистор с прозрачным электродом на основе оксида цинка.

Предмет исследования: электрофизические параметры тонкопленочного транзистора с прозрачным электродом на основе оксида цинка.

Полученные результаты: алгоритм расчета электрофизических параметров тонкопленочного транзистора с прозрачным электродом на основе оксида цинка и методика измерения заряда поверхностных состояний полупроводника

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 5
1 Анализ современных тонкопленочных транзисторов……...6
1.1 История тонкопленочных транзисторов 7
1.2 Область применения тонкопленочных транзисторов..... 9
1.3 Анализ исследуемого транзистора 11
1.4 Свойства материала оксида цинка..... 15
2 Разработка метода расчета основных параметров и характеристик тонкопленочного транзистора 20
2.1 Расчет параметров и характеристик МДП-транзистора с индуцированным каналом 24
2.2 Расчет характеристик МДП-транзистора 28
2.3 Расчет эффективной длины канала……..35
3 Разработка методики измерения встроенного заряда диэлектрика и заряда поверхностных состояний полупроводника..... 38
3.1 Обзор МДП- структуры..... 38
3.2 Теория вольт-фарадных характеристик МДП- транзистора..... 43
3.3 Методика измерения заряда поверхностных состояний полупроводника 55
4 Техника безопасности и охрана труда работника лаборатории 70
4.1 Расчет освещённости лаборатории по исследованию ВФХ МДП-структур..... 70
Заключение 76
Список использованных источников..... 77
Приложение А. Задание на выпускную квалификационную работу..... 83
Приложение Б. Расчет параметров и характеристик мдп транзистора с индуцированным *n*- каналом в среде программирования *MathCad*..... 84
Приложение В. Презентация ВКР 84
Приложение Г. Заявление и протокол проверки вкр на оригинальность в системе «Антиплагиат. ВУЗ» 84

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность данной темы заключается в том, что сегодня электроника начинает претерпевать изменения: все больший спрос начинают приобретать приборы, которые могут использоваться в повседневной жизни, такие как медицинские датчики, солнечные батареи, гибкие дисплеи и т. д. Также современные изделия микроэлектронной техники довольно трудоемкий и сложный процесс, вследствие чего цена такого продукта относительно высокая. Переход на тонкопленочные транзисторы приведут к уменьшению себестоимости продуктов электронной техники, так как переход от классической кремниевой технологии на гибкие подложки приведет к тому, что приборы можно будет производить на пластиковой или бумажной ленте, словно печать газет.

Цель: исследовать основные параметры и характеристики тонкопленочного транзистора с прозрачным электродом на основе оксида цинка.

Задачи:

1. Произвести анализ литературы про современные тонкопленочные транзисторы: область применения, материалы затвора и подзатворного диэлектрика.

2. Разработать метод, позволяющий рассчитать основные параметры и характеристики тонкопленочных транзисторов

3. Разработать алгоритм измерения параметров, которые невозможно точно вычислить на стадии разработки, а именно: встроенного заряда диэлектрика и заряда поверхностного слоя полупроводника.

Объект исследования: тонкопленочный транзистор с прозрачным электродом на основе оксида цинка.

Предмет исследования: электрофизические параметры тонкопленочного транзистора с прозрачным электродом на основе оксида цинка.

1 Анализ современных тонкопленочных транзисторов

Тонкопленочные транзисторы (*TFT*) – это особый вид полевых транзисторов, изготавливаемых путем нанесения тонких пленок активного полупроводникового слоя, а также слоя диэлектрика и металлических контактов поверх поддерживающей (но непроводящей) подложки [1,2]. За последние 15 лет *TFT* превратились в огромную индустрию, основанную на приложениях для отображения информации, памяти, электронной бумаги и так далее [3,4, 5,6]. Как правило, обычной подложкой в TFT является стекло, которое отличается от обычного транзистора, где подложкой обычно является полупроводниковый материал, такой как кремниевая пластина. TFT включают в себя три основных элемента: тонкую полупроводниковую пленку; изолирующий слой; и три электрода (затвор, исток и сток) [7,8,9]. Исток и сток находятся в контакте с полупроводниковой пленкой на небольшом расстоянии друг от друга. Затвор отделен от полупроводниковой пленки изолирующим слоем [10].

1.1 История тонкопленочных транзисторов

История *TFT* действительно началась с работы П. К. Веймера в лабораториях *Radio Corporation of America* (*RCA*) в 1962 году [11]. В то время Веймер изготовил первый *TFT*-дисплей на основе тонких пленок поликристаллического сульфида кадмия в качестве полупроводниковых материалов. В 1970-х годах реализация кристаллического кремния в качестве активных материалов с низкой стоимостью кардинально изменила перспективы *TFT* [12]. В 1979 году Лекомбер и соавторы представили аморфный кремний в качестве нового активного материала [13], что имело глубокие последствия для *TFT*. В 1980 году Депп и другие (др.) сообщили о поликремниевом *TFT* [14].

В 1986 году было сообщено о первом транзисторе на основе органического полупроводника [15]. По сравнению с обычными кремниевыми *TFT*-дисплеями, органические *TFT* (*OTFT*) гораздо менее сложны в процессе изготовления и могут быть естественным образом совместимы с пластиковыми подложками для легких и складываемых изделий [16]. Для разработки крупномасштабных *TFT* температура обработки должна становиться все ниже и ниже. В 2004 году Номура и др. использовали сложный полупроводниковый слой In-Ga-Zn-O (IGZO) в *TFT*, что позволило добиться обработки полупроводникового слоя при комнатной температуре [17]. Оглядываясь назад, на прошедшие полвека, *TFTs* бесконечно продвигалась вперед от первоначальных требований к производительности к сегодняшнему применению с большой площадью и низкой стоимостью.

Во время разработки *TFT* модель полупроводникового устройства представляет собой важный мост между производителями полупроводников и схемотехникой. Разработчики интегральных схем (ИС) обычно используют различные виды программного обеспечения (такие как *Cadence, SPICE, PHILIPAC*) для проектирования схем [18,19,20]. Ядром соответствующего программного обеспечения является модель каждого единичного устройства.

Поскольку микросхема состоит из нескольких транзисторов, если всем единичным устройствам потребуется запустить сложную модель транзистора, моделирование на системном уровне выйдет за рамки возможностей компьютера и, следовательно, приведет к несогласованности вычислений. В противном случае, для обеспечения надежности моделирования, модель устройства также должна быть способна точно описывать физические свойства [21]. Компактная модель является важнейшим этапом в цикле проектирования современных микросхемных продуктов [22]. Это относится к разработке моделей интегральных полупроводниковых устройств для использования в схемотехническом моделировании. Компактная модель обычно используется для воспроизведения поведения терминала устройства с точностью, вычислительной эффективностью, простотой извлечения параметров и относительной простотой модели для

моделирования схемы или системного уровня, для будущих технологических узлов [23].

Точные и физически компактные модели необходимы для цифровых и аналоговых схем. Вообще говоря, превосходная компактная модель должна включать следующие требования [21,24]:

- последовательно отображать поведение;

- быть симметричной, чтобы отражать симметрию структуры *TFT*;

- быть аналитической, без дифференциалов или интегралов;

- быть простой и легко выводимой;

- параметры, которые могут быть легко охарактеризованы или даже угаданы;

- поддающиеся обновлению и редукции;

- соотношения могут быть физически обоснованы;

- быть похожим по форме и соответствию компактным моделям для других *TFT*;

- быть настраиваемым на неточные (или неопределенные) экспериментальные данные.

Первая компактная модель могла бы датироваться 1983 годом, в котором Качпржак и соавторы предложили компактную модель постоянного тока полевых транзисторов GaAs для компьютерного расчета с большим сигналом [25]. В 1986 году сообщалось о компактной модели для устройств *poly*-Si в режиме накопления [26]. Позже для компактных моделей *TFT* на основе кремния было введено множество методов, таких как модель зарядового слоя, подход эффективной среды (*EMA*), полуэмпирический подход, модель генерации-рекомбинации и модель, основанная на поверхностном потенциале [27-32]. Затем, с появлением новых *TFT*, например, *OTFT* и IGZO *TFT*, было разработано несколько превосходных компактных моделей, основанных на интересных методах [33-37]. Строго говоря, все предлагаемые компактные модели можно разделить на две категории. Одна основана на заряде, а другая – на поверхностном потенциале. Считается, что по сравнению с моделью, основанной

на заряде, компактная модель, основанная на поверхностном потенциале, обладает высокой точностью и может быть легко упрощена до модели, основанной на заряде и пороговом напряжении [21,38,39].

1.2 Область применения тонкопленочных транзисторов

В 2007 году производители дисплеев изготовили около 50 квадратных километров жидкокристаллических дисплеев, содержащих около 10-15 *TFT* и продали их примерно за 100 миллиардов долларов. Большая часть этих *TFT* изготовлена из аморфного кремния (*a*-Si), а меньшая часть – из поликристаллического кремния. Дисплеи на сегодняшний день являются самым распространенным применением *TFT*, но они также используются в цифровых рентгеновских устройствах формирования изображений и имеют потенциальное применение в метках радиочастотной идентификации (*RFID*), чувствительных устройствах, различных медицинских приложениях и недорогой одноразовой электронике. Несмотря на успех тонкопленочного Si, ведется активный поиск новых и более совершенных *TFT* для удовлетворения ожидаемых будущих потребностей.

Дисплеи на органических светодиодах (*OLED*): *OLED*-дисплеи желательны из-за лучшей цветовой гаммы, более тонкого формата, более низкого энергопотребления и потенциально более низких производственных затрат. *A*-Si *TFT* лишь незначительно подходят для управления *OLED*-дисплеями. Низкая температура поли-кремниевых *TFTs* лучше в силу их более высокой мобильности, но являются более дорогостоящими для изготовления. Следовательно, есть возможность для улучшения *TFT*.

Гибкая электроника: гибкие дисплеи, которые отличаются прочностью, легким весом и возможностью сворачивания в рулон, привлекательны для мобильных телефонов, портативных компьютеров, электробумаги или других применений. Пластик является идеальной подложкой, но в большинстве случаев размягчается при температуре около 200 ºС, что ниже температуры, при которой обычно осаждается *a*-Si.

Низкая стоимость изготовления: рынок дисплеев, особенно в форматах большего размера, ограничен высокими производственными затратами и очень привлекательной альтернативой является изготовление дисплеев с использованием технологий печати, возможно, на веб-принтере непрерывного действия. В большинстве методов печати используются жидкости, а поскольку *a*-Si не имеет жидкой формы, требуется новый набор *TFT* материалов.

Новые функциональные возможности: всегда существует интерес к устройствам с более высокой производительностью для расширения пространства приложений, например, к высокопроизводительным детекторам и расширенной интеграции драйверов и логических схем в объединительные платы дисплея. *TFT* имеют те же корни, что и производство кремниевых полевых транзисторов (*FET*) и интегральных схем (*IC*), но две технологии-логики разошлись, потому что они обусловлены различными применениями. Кремниевые микросхемы становятся все более плотными, поскольку размер не является ограничением, а стоимость и производительность повышаются по мере уменьшения размера элемента. Напротив, причиной *TFT* является скорее большой размер подложки, чем плотность устройства. В результате различных методов изготовления стоимость единицы площади *TFT* намного ниже, чем у кремниевых микросхем, но стоимость одного полевого транзистора намного выше.

Поэтому *TFT* не могут конкурировать с кремниевыми микросхемами по вычислительной мощности, а кремниевые микросхемы никогда не будут изготавливаться в массивах размером в квадратный метр. Существует всего несколько применений, где выбор между *TFT* и кремниевыми микросхемами не очевиден. Первые *TFT* были изготовлены в 1960-х годах, а в начале 1970-х была продемонстрирована работа жидкокристаллического дисплея (*LCD*) на основе CdSe *TFT* [40]. Дальнейшее развитие замедлилось, частично из-за отсутствия хорошего применения для ЖК-дисплеев, и устройства CdSe оказалось трудно надежно изготовить. В конце 1970-х годов аморфный кремний показал себя многообещающим в *TFT*-устройствах, и Университет Данди был первым, кто

продемонстрировал, что *a*-Si *TFT* может управлять жидкокристаллическим дисплеем. Примерно в это же время идея жидкокристаллического дисплея для портативного компьютера стала ключевой, позволившей применить его, поскольку ни одна другая технология отображения не была достаточно компактной. Аморфный кремний оказался подходящим материалом в нужное время. Его *TFT*- свойства соответствовали потребностям ЖК-дисплея и производственным методам, основанным на процессах, разработанных для кремниевых микросхем [41].

1.3 Анализ исследуемого транзистора

Транзистор проектируется на кремниевой подложке, так как кремниевая технология наиболее разработана, самая распространенная. Вследствие этого на рисунке 1.1 представлены параметры кремния при температуре 300 К.

Термин «МДП-транзистор» используется для обозначения полевых транзисторов, в которых управляющий электрод – затвор – отделен от активной области полевого транзистора диэлектрической прослойкой – изолятором. Основным элементом для этих транзисторов является структура металл – диэлектрик – полупроводник. По этой причине в названии транзистора используется аббревиатура МДП.

Параметры	Кремний Si
Относительная диэлектрическая проницаемость ε	12
Поле пробоя $E_{кр}$, $В \cdot см^{-1}$	$3 \cdot 10^5$
Ширина запрещённой зоны $\varphi_з$, эВ	1,12
Эффективная плотность состояний в зоне проводимости N_C, $см^{-3}$	$2{,}8 \cdot 10^{19}$
Эффективная плотность состояний в валентной зоне N_{V}, $см^{-3}$	10^{19}
Собственная концентрация n_i $см^{-3}$	$1{,}45 \cdot 10^{10}$
Коэффициент диффузии электронов D_n, $см^2 \cdot с^{-1}$	36
Коэффициент диффузии дырок D_p, $см^2 \cdot с^{-1}$	13
Подвижность электронов, μ_n, $\frac{см^2}{В \cdot с}$	1500
Подвижность дырок, μ_p, $\frac{см^2}{В \cdot с}$	450

Рисунок 1.1 – Параметры кремния при температуре 300 К

Монокристаллический полупроводник *n*- или *p*-типа, на котором изготавливается МДП-транзистор, получил название подложки. Две сильнолегированные области противоположного с подложкой типа проводимости получили название исток и сток. Область полупроводниковой подложки, находящаяся под затвором между истоком и стоком, называется каналом. Диэлектрический слой, находящийся между затвором и каналом, получил название подзатворного диэлектрика. В качестве полупроводниковой подложки в большинстве МДП-транзисторов используется кремний, а в качестве подзатворного диэлектрика – двуокись кремния. По этой причине как синоним для МДП-транзисторов используется термин «МДП-транзистор». Канал в МДП-транзисторах может быть как индуцированным, так и встроенным.

Так как подвижность электронов в кремнии больше, чем дырок, для увеличения быстродействия лучше выбрать МДП транзистор с *n*-каналом.

На рисунке 1.2 указана топология и основные элементы МДП транзистора.

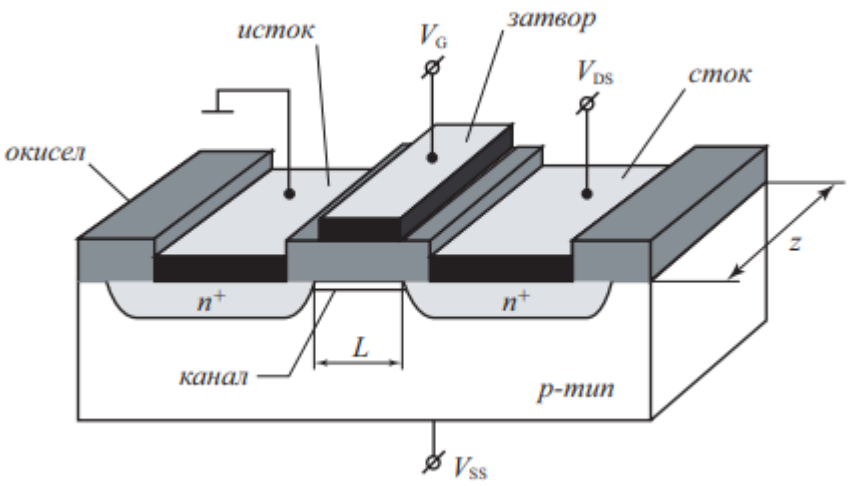
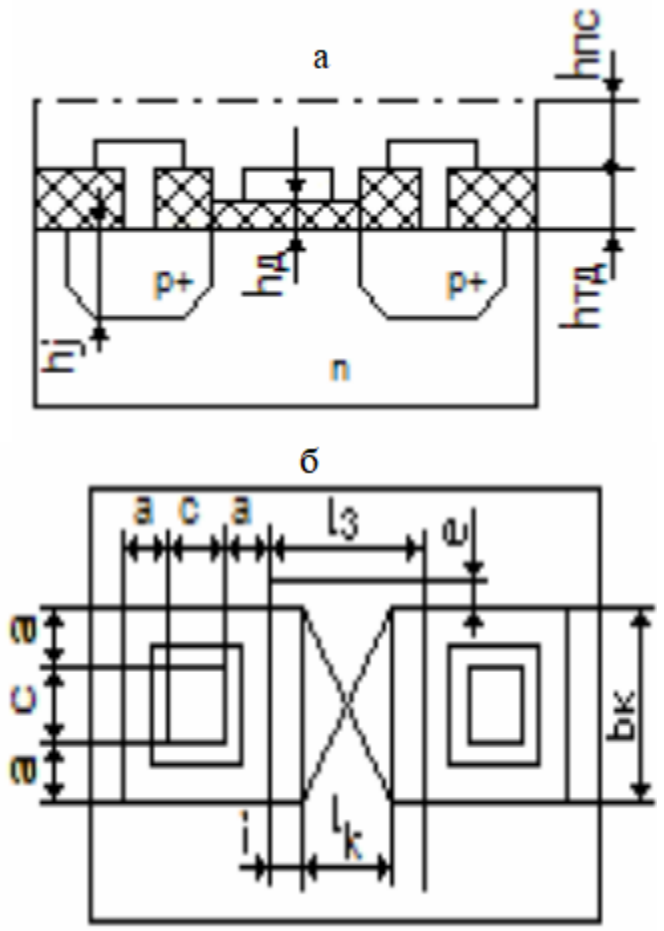


Рисунок 1.2 – Топология и основные элементы МДП транзистора

По сравнению с МДП транзистором с индуцированным каналом, в МДП транзисторе со встроенным каналом при напряжении на затворе 0 В уже есть канал, следовательно, транзистор включен. Для отключения транзистора необходимо подать напряжение смещения, следовательно, необходимо использовать дополнительный источник, что увеличивает сложность схемы. Поэтому берется в МДП транзистор с индуцированным каналом.

Материл электродов для стока и истока должен образовывать с полупроводником омический контакт, то есть не должен образовывать выпрямляющий контакт. Для этого должно выполняться условие: работа выхода полупроводника должна быть меньше работы выхода металла.

На рисунке 1.3 указано схематическое изображение топологии МДП транзистора.



а – вид сбоку; б – вид сверху

Рисунок 1.3 – Схематическое изображение топологии МДП транзистора

Электроды истока, стока и затвора играют жизненно важную роль в определении производительности транзистора. Электроды источника и стока вводят и извлекают носители заряда соответственно в активный слой и из него, в то время как затвор управляет проводимостью канала. Инжекция и извлечение носителей заряда регулируется пограничным барьером между металлом источника/стока и полупроводником. Контакты должны иметь низкое сопротивление таким образом, приложенное напряжение может создавать достаточный ток проводимости без значительного падения на контактах [42-44].

Выбор материала электрода затвора должен основываться на хорошей адгезии и способности формировать рисунок к подложке и диэлектрику затвора. Более того, работа работы металла затвора должна быть сравнима с активным полупроводниковым слоем при достижении более низкого порогового напряжения. Такие электродные материалы, которые проявляют хорошую

адгезивность, включают сильно легированные Si, Al, Au и оксид индия-олова (ITO).

Изоляционный материал должен обладать высоким сопротивлением, чтобы предотвратить прохождение тока утечки между затвором и активным слоем. Высокоомный изолятор уменьшает плотность межфазной ловушки, что, в свою очередь, увеличивает подвижность и ток. Накопление носителей заряда на границе раздела полупроводник/изолятор сильно зависит от диэлектрической постоянной изолятора. Изолятор должен обладать высокой диэлектрической проницаемостью для достижения достаточной емкости, что обеспечивает высокий ток стока из-за накопления большого количества носителей заряда на границе раздела полупроводник/изолятор [45-48].

В нашей работе в качестве затвора будет использоваться тонкая пленка на основе оксида цинка (ZnO). Выбор этого материала связан с его свойствами: возможность получения наноразмерных структур различными методами, например, золь-гель технологией, высокий коэффициент пропускания в видимом диапазоне [49-52].

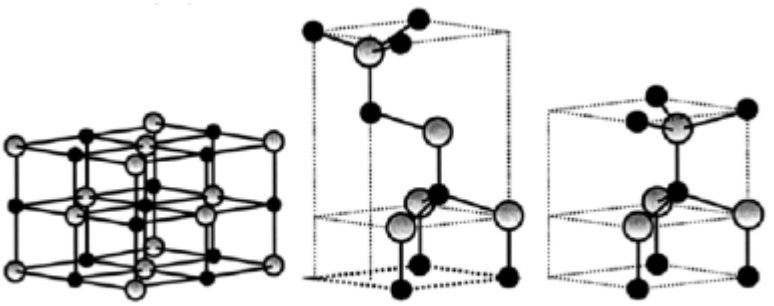
1.4 Свойства материала оксида цинка

Оксид цинка кристаллизуется в следующих структурах, которые указаны на рисунке 1.4:

1) структура вюрцита, структурный тип *B*4, пространственная группа *P*6З*mc*, координационные числа (КЧ): $КЧ_{Zn} = КЧ_{O} = 4$ (тетраэдрическое окружение);

2) структура сфалерита, или цинковая обманка, структурный тип *B*З, пространственная группа $F\bar{4}3m$, $КЧ_{Zn} = КЧ_{O} = 4$ (тетраэдрическое окружение);

3) структура каменной соли – NaCl, структурный тип *B*1, пространственная группа *Fm*З*m*, $КЧ_{Zn} = КЧ_{O} = 6$ (октаэдрическое окружение).



а – кубическая структура хлорида натрия; б – кубическая структура цинковой обманки; в – гексагональная структура вюрцита.

Рисунок 1.4 – Кристаллические структуры ZnO

Серые и черные сферы обозначают атомы Zn и O, соответственно.

Наиболее характерной для оксида цинка является структура вюрцита, которую можно представить как гексагональную плотнейшую упаковку анионов, в которой катионы равномерно занимают половину всех тетраэдрических пустот. Координационные числа цинка и кислорода равны 4 (тетраэдрическая координация).

Далее будет рассмотрен ZnO с кристаллической структурой вюрцита.

Нестехиометрия оксида цинка ZnO вызвана образованием собственных точечных дефектов. Избыток Zn по сравнению со стехиометрическим соотношением [Zn]:[O] = 1 может быть обусловлен образованием как междоузельных атомов цинка, так и вакансий кислорода. Оба типа дефектов являются донорными и, по мнению большинства исследователей, отвечают за *n*-тип проводимости материала, однако имеющиеся в литературе данные не позволяют однозначно сделать вывод о природе дефектов.

Объемный ZnO, выращенный методом парофазного транспорта: $6.0*10^{16}$ $см^{-3}$, подвижность электронов – 205 $см^2/(В*с)$. На рисунке 1.5 указана теоретическая зависимость подвижности Холла от температуры.

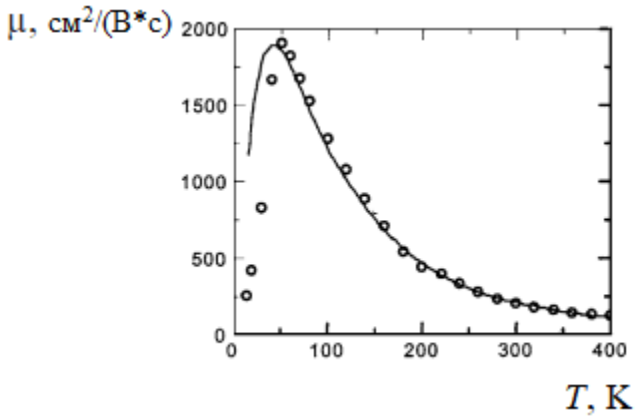


Рисунок 1.5 – Теоретическая зависимость подвижности Холла от температуры

На рисунке 1.6 указана теоретическая зависимость собственной концентрации примеси от обратной температуры.

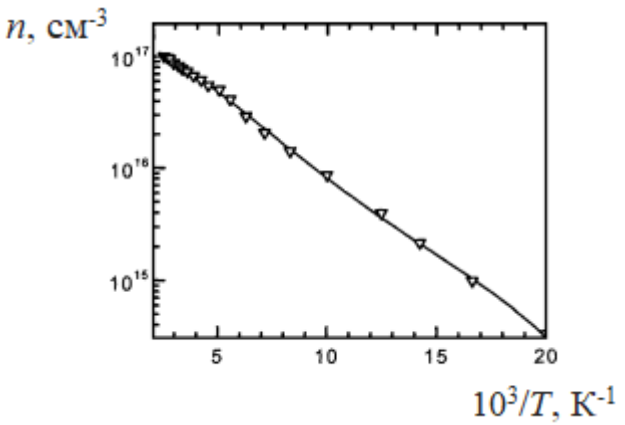


Рисунок 1.6 – Теоретическая зависимость собственной концентрации примеси от температуры

Ширина запрещенной зоны: 3,37 эВ. Энергия сродства к электрону оксида цинка равна 4,5 эВ.

Легирование ZnO n-типа относительно легко по сравнению с легированием p-типа.

Элементы III группы Al, Ga и In в качестве замещающих элементов для Zn и элементы VII группы Cl и I в качестве замещающих элементов для O могут быть использованы в качестве легирующих добавок *n*-типа.

Многие пытались легировать Al, Ga и In, что привело к получению высококачественных высокопроводящих пленок ZnO *n*-типа [53].

В проводящих свойствах тонких пленок ZnO в первую очередь доминируют электроны, генерируемые кислородными вакансиями и донорством заряда. Гэн и его коллеги исследовали влияние концентрации Al на электрические свойства тонких пленок ZnO:Al, выращенных на подложке Si(100) методом атомно-слоевого осаждения. Кристалличность пленки ухудшалась, в то время как было обнаружено, что удельное сопротивление уменьшается с увеличением концентрации легирования Al (9,36 × 10-4 Ом·см при максимальной концентрации легирования 2,7 ат.%).

Удельное сопротивление азопленки уменьшалось с увеличением содержания Al до 7 ат.%, а затем увеличивалось при высоком содержании Al 8 ат.%, что показано на рисунке 1.7.

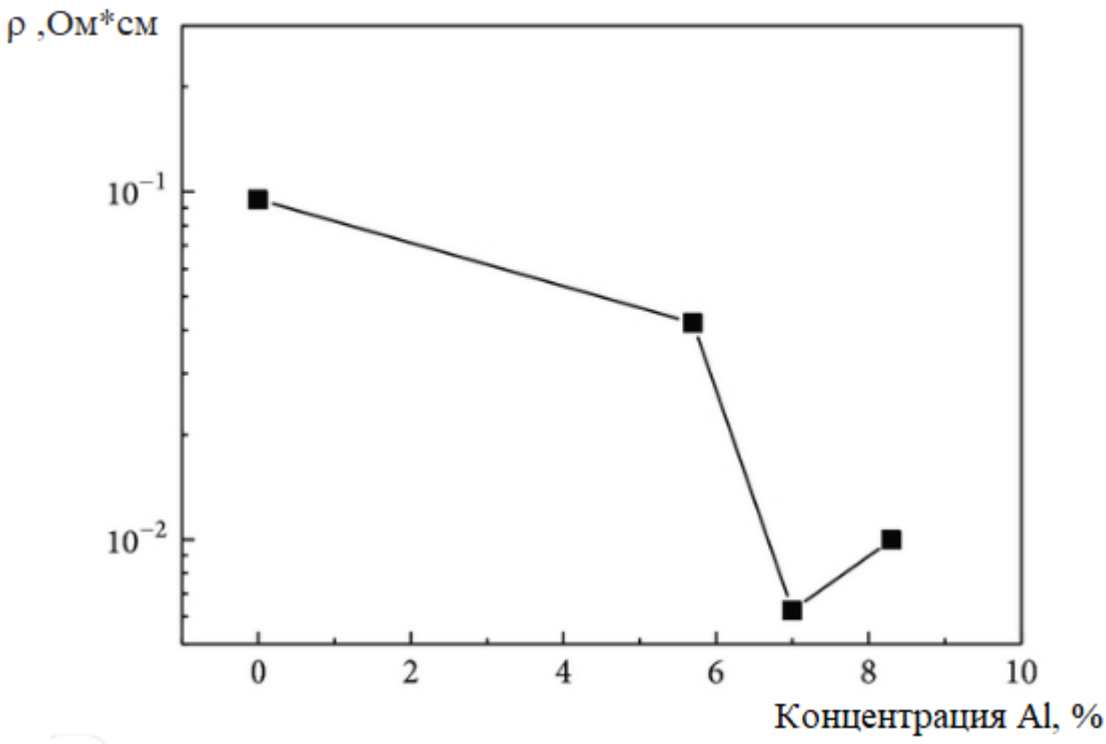


Рисунок 1.7 – Зависимость удельного сопротивление от содержания Al (0 до 8,4 ат.%)

Фтор является еще одной легирующей добавкой для улучшения проводимости пленок. В отличие от алюминия и других элементов III группы, влияние фтора в ZnO обсуждается меньше. Фтор включается в решетку путем замещения атомов кислорода из-за сопоставимости ионного радиуса. На самом деле пленки ZnO:F обладают хорошими комбинированными свойствами.

Полученные пленки FZO методом импульсного лазерного осаждения, получают удельное сопротивление 4,8 × 10^{-4} Ом·см, концентрацию носителей 5,43*10^{20} $см^{-3}$ и подвижность Холла 23,8 $см^2/(В*с)$ соответственно. Среднее оптическое пропускание во всей видимой области длин волн было выше 90%.

Разница радиусов между легирующими ионами и ионами Zn^{2+} или ионами O^{2-} приведет к изменению постоянной решетки и ухудшению кристалличности оксида цинка. Эта проблема может быть частично решена с помощью кодирования, что привело к резкому росту исследований в последние годы. Высокое качество пленок, нанесенных методом, разработанного Шином, подтвердил преимущества кодирования. По мере увеличения концентрации Ga с 0,5 до 2 ат.% концентрация носителей для тонких пленок ZnO, легированных Mg и Ga (MGZO), увеличиваются по сравнению с таковой для тонких пленок ZnO, легированных чистым ZnO и Mg, как показано на рисунке 5, что подразумевает замену Ga3+ ионы с ионами Zn^{2+}. Более того, структура MGZO была значительно стабилизирована этим методом. Низкое электрическое сопротивление и широкая энергия запрещенной зоны тонких пленок MGZO могут быть приписаны легирующей примеси Ga и Mg соответственно [53,54].

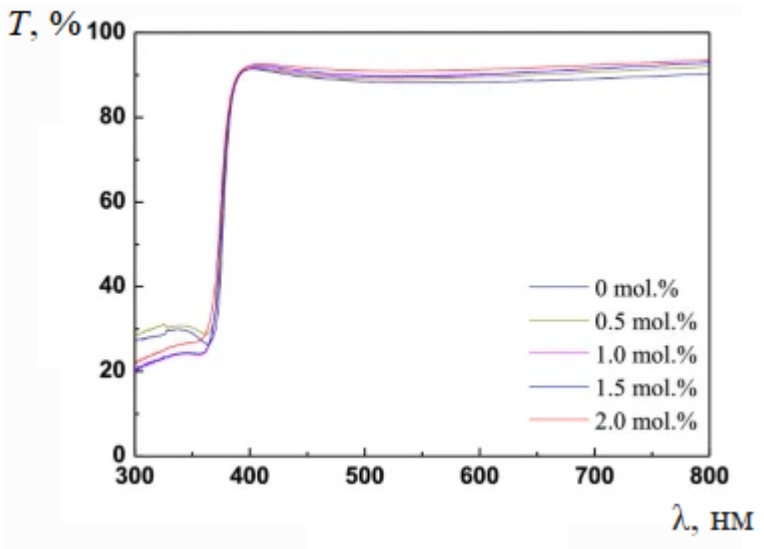


Рисунок 1.8 Спектры оптического пропускания тонких пленок при различных концентрациях легирующих примесей Al

2 Разработка метода расчета основных параметров и характеристик тонкопленочного транзистора

Алгоритм расчета параметров и характеристик МДП-транзистора с индуцированным каналом:

1) расчет порогового напряжения МДП-транзистора:

1.1) расчет диффузионной длины;

1.2) расчет потенциала начала сильной инверсии;

1.3) расчет функции, задающей распределение напряженности поля вблизи поверхности при потенциале начала сильной инверсии;

1.4) расчет заряда области объемного заряда (ООЗ) в обедненной области подложки;

1.5) расчет удельной емкости диэлектрика;

1.6) расчет контактной разности потенциала;

1.7) расчет порогового напряжения МДП-транзистора;

2) расчет максимальных напряжений на затворе и стоке:

2.1) расчет напряжения лавинного пробоя;

2.2) расчет напряжения смыкания сток-исток;

2.3) расчет напряжения пробоя затвор-исток;

2.4) выбор меньшего напряжения между напряжениями лавинного пробоя и смыкания сток-исток;

2.5) расчет максимальных напряжений сток-исток и затвор-исток с учетом коэффициента запаса;

3) расчет выходных характеристик МДП-транзистора:

3.1) расчет энергии уровня Ферми при потенциале начала сильной инверсии;

3.2) расчет напряжения сток-исток насыщения;

3.3) расчет тока стока на крутом участке;

3.4) расчет напряжения плоских зон;

3.5) расчет длины канала, отсекаемой ООЗ вблизи стока;

3.6) расчет тока стока на пологом участке;

4) расчет крутизны передаточных характеристик МДП-транзистора:

4.1) расчет крутизны передаточных характеристик на крутом участке;

4.2) расчет крутизны передаточных характеристик на пологом участке;

5) расчет сопротивления сток-исток в открытом состоянии;

6) расчет активной составляющей выходной проводимости

6.1) расчет активной составляющей выходной проводимости на крутом участке;

6.2) расчет активной составляющей выходной проводимости на пологом участке;

7) расчет частотных свойств:

7.1) расчет входной емкости на крутом участке;

7.2) расчет постоянной времени;

7.3) расчет граничной частоты;

8) расчет реальной длины канала:

8.1) расчет толщины *p*-*n* перехода;

8.2) расчет эффективной длины канала;

8.3) расчет изменения реальной длины перехода от геометрической.

Исходные данные для расчета указаны в таблице 2.1. Также в исходных данных указывались тип подложки и материал электрода затвора: кремниевая *p* – типа и ZnO соответственно. Подзатворный диэлектрик выбирается из условия: $n_{диэл} \approx \sqrt{n_{Si} * n_{ZnO}} \approx \sqrt{3,42*1,9} \approx 2,549$. У Al_2O_3 коэффициент преломления 2,4028 – выбирается этот материал. Энергия сродства к электрону, энергия Ферми при нормальных условиях и ширина запрещенной зоны у оксида цинка равны 4,5 эВ, 0,6 эВ и 3,2 эВ соответственно [56-58].

Таблица 2.1 – Исходные данные

Название	Обозначение	Значение	Единицы измерения
Концентрация примесей в положке	$N_{пр}$	$50*10^{20}$	$м^{-3}$
Толщина Al_2O_3	$h_{Al_2O_3}$	$45*10^{-9}$	м
Длина канала	$l_к$	$15*10^{-6}$	м
Ширина канала	$b_к$	$10*10^{-6}$	м
Глубина залегания областей стока и истока	x_{pn}	$2*10^{-6}$	м
Концентрация примесей областей истока и стока	$N_{си}$	$100*10^{24}$	$м^{-3}$
Нормальная температура	$T_{норм}$	300	К
Минимальная температура	T_{min}	198	К
Максимальная температура	T_{max}	398	К

В таблице 2.2 указаны данные, которые будут необходимы в дальнейших расчетах.

Таблица 2.2 – Данные, необходимые в расчетах

Название	Обозначение	Значение	Единицы измерения
Диэлектрическая проницаемость Si_3N_4	$\varepsilon_{Al_2O_3}$	8,25	–
Диэлектрическая проницаемость Si	ε_{Si}	12	–
Диэлектрическая постоянная	ε_0	$8,85*10^{-12}$	Ф/м
Собственная концентрация примесей	n_i	$1,45*10^{16}$	$м^{-3}$
Ширина запрещенной зоны Si	ΔE_g	1,12	эВ
Заряд электрона	q	$1,6*10^{-19}$	Кл
Постоянная Больцмана	k	$1,38*10^{-23}$	Дж/К
Работа выхода затвора	$A_м$	4,5	эВ
Энергия сродства Si	χ_{Si}	4,15	эВ
Пробивная напряженность Al_2O_3	$E_{Al_2O_3}$	10^8	В/м
Подвижность дырок	μ_p	450	$см^2/(В*с)$
Коэффициент преломления диэлектрика	$n_{Al_2O_3}$	2,4028	–
Энергия сродства к ZnO	χ_{ZnO}	4,5	эВ
Ширина запрещенной зоны ZnO	ΔEg_{ZnO}	3,2	эВ
Энергия Ферми ZnO	Ef_{ZnO}	0,6	эВ

2.1 Расчет параметров и характеристик МДП-транзистора с индуцированным каналом

Все расчеты сделаны в среде программирования *MathCad* приведены в приложении Б.

2.1.1 Пороговое напряжение МДП-транзистора. Пороговое напряжение МДП-транзистора находится по формуле 2.1:

$$U_{\text{зипор}} = -\frac{Q_{sc}}{C_d} + \varphi_t * y_s - \varphi_k, \quad (2.1)$$

где: φ_t=0,026 – тепловой потенциал при температуре 300 К. C_d – удельная емкость диэлектрика под затвором на единицу площади; y_s – безразмерный потенциал, соответствующий началу сильной инверсии; φ_k – контактная разность потенциалов между затвором и диэлектриком; Q_{sc} – заряд ООЗ в обедненной области подложки.

Заряд ООЗ в обедненной области подложки находится по формуле 2.2:

$$Q_{sc} = 2 * q * n_i * L_d * F(y_s), \quad (2.2)$$

где: L_d – диффузионная длина; $F(y_s)$ – функция, задающая распределение напряженности поля вблизи поверхности.

Диффузионная длина находится по формуле 2.3.

$$L_d = \sqrt{\frac{\varepsilon_{\text{п/п}} * \varepsilon_0 * k * T}{2 * n_i * q^2}}. \quad (2.3)$$

Тогда, диффузионная длина равна:

$$L_d = \sqrt{\frac{12 * 8.85 * 10^{-12} * 1.38 * 10^{-23} * 300}{2 * 1.45 * 10^{16} * (1.9 * 10^{-19})^2}} = 2.435 * 10^{-5} \text{ м}.$$

Функция, задающая распределение напряженности поля вблизи поверхности, находится по формуле 2.4.

$$F(y_s) = \left(\frac{N_{\text{пр}}}{n_i}\right)^{\frac{1}{2}} * \exp\left(\frac{y_s}{2}\right), \quad (2.4)$$

где: y_s – безразмерный потенциал начала сильной инверсии.

Потенциал начала сильной инверсии по формуле 2.5.

$$y_s = 2 * \ln(\frac{N_{\text{пр}}}{n_i}) \quad . \tag{2.5}$$

Тогда, потенциал начала сильной инверсии равен:

$$y_s = 2 * \ln(\frac{50 * 10^{20}}{1.45 * 10^{16}}) = 25.502 \, .$$

Функция, задающая распределение напряженности поля вблизи поверхности, равна:

$$F(y_s) = (\frac{50 * 10^{20}}{1.45 * 10^{16}})^{\frac{1}{2}} * \exp(\frac{-25.502}{2}) = 1.703 * 10^{-3} .$$

Заряд ООЗ в обедненной области подложки:

$$Q_{sc} = 2 * 1.6 * 10^{-19} * 1.45 * 10^{16} * 2.434 * 10^{-5} * 1.703 * 10^{-3} = 1.92 * 10^{-10} \text{ Кл/м}^{-2}.$$

Удельная емкость диэлектрика под затвором на единицу площади находится по формуле 2.6.

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 * \varepsilon_{\text{диэл}}}{h_{\text{диэл}}} . \tag{2.6}$$

Удельная емкость диэлектрика равна:

$$C_0 = \frac{8.85 * 10^{-12} * 8.5}{45 * 10^{-9}} = 1.672 * 10^{-3} \text{ Ф/м}^2.$$

Контактная разность потенциалов находится по формуле 2.7.

$$\varphi_k = A_{\text{Si}} - A_{\text{ZnO}} , \tag{2.7}$$

где: A_{Si} – работа выхода из кремния; A_{ZnO} – работа выхода из оксида цинка.

Работа выхода из полупроводника находится по формуле 2.8.

$$A_{sc} = \chi_{sc} + 0.5 * \Delta Eg_{sc} - Ef_{sc} , \tag{2.8}$$

где: $Ef_{sc} = \ln(\frac{N_{\text{пр}}}{n_i}) * \varphi_t$.

Работа выхода из кремния и оксида цинка:

$$A_{\text{Si}} = 4.15 + 0.5 * 1.12 - (-\ln(\frac{50 * 10^{20}}{1.45 * 10^{16}}) * 0.026) = 5.04 \text{ эВ};$$

$$A_{\text{ZnO}} = 4.5 + 0.5 * 3.2 - 0.6 = 5.5 \text{ эВ}.$$

Контактная разность потенциалов равна:

$$\varphi_k = 5.04 - 5.5 = -0.46 \text{ эВ}.$$

Пороговое напряжение МДП-транзистора равно:

$$U_{\text{зипор}} = \frac{-1.92 * 10^{-10}}{1.672 * 10^{-3}} + 0.026 * 25.502 + 0.46 = 1.12 \text{ В}.$$

2.1.2 Расчет напряжения лавинного пробоя. Напряжение лавинного пробоя находится по формуле 2.9.

$$U_{\text{проб}} = 48 * \rho^{0.78} \quad (2.9)$$

где: ρ – удельное сопротивление подложки.

Удельное сопротивление подложки находится по формуле 2.10.

$$\rho = \frac{1}{q * \mu_p * N_{\text{пр}}}. \quad (2.10)$$

В формулу 2.8 необходимо подставлять размерность удельного сопротивления Ом*см, следовательно, подвижность дырок и концентрацию примеси в подложке в формуле 2.10 подставляются в соответствующей размерности:

$$\rho = \frac{1}{1.6 * 10^{-19} * 450 * 5 * 10^{15}} = 2.778 \text{ Ом*см}.$$

Напряжение лавинного пробоя:

$$U_{\text{проб}} = 48 * 2.778^{0.78} = 106.494 \text{ В}.$$

2.1.3 Расчет напряжения смыкания стока и истока. Напряжение смыкания стока и истока находится по формуле 2.11.

$$U_{\text{см}} = \frac{q * N_{\text{пр}} * l_{\text{к}}^{\,2}}{2 * \varepsilon_{Si} * \varepsilon_0}. \quad (2.11)$$

Напряжение смыкания стока и истока:

$$U_{\text{см}} = \frac{1.6 * 10^{-19} * 50 * 10^{20} * (15 * 10^{-6})^2}{2 * 12 * 8.85 * 10^{-12}} = 847.458 \text{ В}.$$

2.1.4 Расчет напряжения пробоя затвор-исток. Напряжение пробоя затвор-исток находится по формуле 2.12.

$$U_{зи} = E_{Al_2O_3} * h_{Al_2O_3}, \quad (2.12)$$

где: $E_{Al_2O_3}$ – напряженность пробоя Al_2O_3.

Тогда, напряжение пробоя затвор-исток равно:

$$U_{зи} = 10^8 * 45 * 10^{-9} = 4.5 \text{В}.$$

2.1.5 Расчет максимальных напряжения сток-исток и затвор-исток. Максимальное напряжение выбирается с учетом запаса. Для напряжения сток-исток оно выбирается из напряжения лавинного пробоя и напряжения смыкания, коэффициент запаса для него равен 1,4. Напряжение лавинного пробоя меньше, следовательно, через него и рассчитывается максимальное напряжение сток-исток по формуле 2.13.

$$U_{си_{max}} = \frac{106.494}{1.4} = 76.067 \text{ В}. \quad (2.13)$$

Округлив, получим максимальное напряжение сток-исток $U_{си_{max}} = 75 \text{В}$.

Для максимального напряжения затвор-исток коэффициент запаса равен 2. Оно находится по формуле 2.14.

$$U_{зи_{max}} = \frac{4.5}{2} = 2.25 \text{ В}. \quad (2.14)$$

Округлив, получим максимальное напряжение затвор-исток $U_{зи_{max}} = 2.2 \text{ В}$.

2.1.6 Расчет начального тока стока. Для расчета начального тока стока необходимо узнать, какая составляющая преобладает: ток генерации или ток экстракции для того, чтобы исключить одну из них. Отношение тока генерации к току экстракции находится по формуле 2.15.

$$\frac{I_{ген}}{I_{экстр}} = \frac{1}{L_d * n_i} \cdot \sqrt{\frac{N_{пр} * \varepsilon_0 * \varepsilon_{Si} * (\varphi_к - U)}{2 * q}}. \quad (2.15)$$

Отношение равно:

$$\frac{I_{ген}}{I_{экстр}} = \frac{1}{2.435 * 10^{-5} * 1.45 * 10^{16}} * \sqrt{\frac{50 * 10^{20} * 8.85 * 10^{-12} * 12 * (-0.46 + 75)}{2 * 1.6 * 10^{-19}}} = 31520$$

Следовательно, током экстракции можно пренебречь и считать, что начальный ток стока равен току генерации. Тогда, начальный ток стока находится по формуле 2.16.

$$Ic_{нач} = I_{ген} = -\frac{n_i}{\tau_0} \cdot \sqrt{\frac{q * \varepsilon_0 * \varepsilon_{Si} * (\varphi_к - U)}{2 * N_{пр}}} * S \quad , \qquad (2.16)$$

где: $\tau_0 = 2.5*10^{-3}$ с, – время жизни носителей заряда; $S_к = l_к * b_к$ – площадь канала.

Начальный ток стока равен:

$$Ic_{нач} = I_{ген} = -\frac{1.45*10^{16}}{2.5*10^{-3}} * \sqrt{\frac{1.6*10^{-19} * 8.85*10^{-12} * (-0.46+75)}{2*50*10^{20}}} * 15*10*10^{-12} =$$

$$= -3.09*10^{-16} \text{ А.}$$

2.2 Расчет характеристик МДП-транзистора

2.2.1 Расчет выходных характеристик. Для расчета необходимо рассмотреть 2 участка: крутой и пологий. Крутой – напряжение сток-исток меньше напряжения сток-исток насыщение; пологий – наоборот, больше.

На крутом участке ток стока находится по формуле 2.17.

$$I_c = \frac{\mu_0 (\frac{T_0}{T})^2}{(1+\frac{U_{синас}}{E_{кр} l})} \frac{b}{l} (((C_0 (U_{зи} - U_{пор}) + |Q_{sc}|) U_{си} - C_0 \frac{U_{си}{}^2}{2} - \frac{4}{3} |Q_{sc}| E_f ((1+\frac{U_{си}}{2|E_f|})^{\frac{3}{2}} - 1)), \quad (2.17)$$

где: μ_0 =750*10^{-4} м^2/(В*с), – подвижность электронов в канале; T_0 =300 К, – комнатная температура; E_f – уровень Ферми при потенциале начала сильной инверсии; $U_{синас}$ – напряжение сток-исток насыщения; $E_{кр}$ =0.8*10^6 В/м; T – температура, при которой производится расчет.

Уровень Ферми при потенциале начала сильной инверсии находится по формуле 2.18.

$$E_f = \varphi_t * y_s . \qquad (2.18)$$

Уровень Ферми при потенциале начала сильной инверсии равен:

$$E_f = 0.026 * 25.502 = 0.66 \text{ эВ}.$$

Напряжение сток-исток насыщения находится по формуле 2.19.

$$U_{\text{синас}} = \frac{U_{\text{зи}} - U_{\text{зипор}}}{1 + \frac{|Q_{sc}|}{4 * C_d * |E_f|}}. \quad (2.19)$$

На пологом участке ток стока находится по формуле 2.20.

$$Ic = \frac{Ic_{\text{нас}}}{1 - \frac{l_{\text{отс}}}{l_{\text{к}}}}, \quad (2.20)$$

где: $I_{\text{с}_{\text{нас}}}$ – ток стока, определяющийся на крутом участке при напряжении сток-исток равном напряжению сток-исток насыщения; $l_{\text{отс}}$ – длина канала, отсекаемая ООЗ вблизи стока.

Длина канала, отсекаемая ООЗ вблизи стока, находится по формуле 2.21.

$$\frac{1}{l_{\text{отс}}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{2\varepsilon_{\text{Si}}\varepsilon_0}{qN_{\text{пр}}}(|U_{\text{си}}| - U_{\text{синас}})}} + \frac{\varepsilon_{\text{Si}}}{\frac{\varepsilon_{SiO_2} * \varepsilon_{Si_3N_4}}{\varepsilon_{SiO_2} + \varepsilon_{Si_3N_4}}(h_{SiO_2} + h_{Si_3N_4})} \frac{1}{(|U_{\text{си}}| - U_{\text{синас}})} *$$

$$*(\alpha(\|U_{\text{си}}| - |U_{\text{зи}}| - |U_{\text{пл.з}}|) + \beta(\|U_{\text{си}}| - |U_{\text{зи}}| - |U_{\text{пл.з}}\|)), \quad (2.21)$$

где: α=0.2, β=0.6 – подгоночные коэффициенты; $U_{\text{пл.з}}$ – напряжения плоских зон.

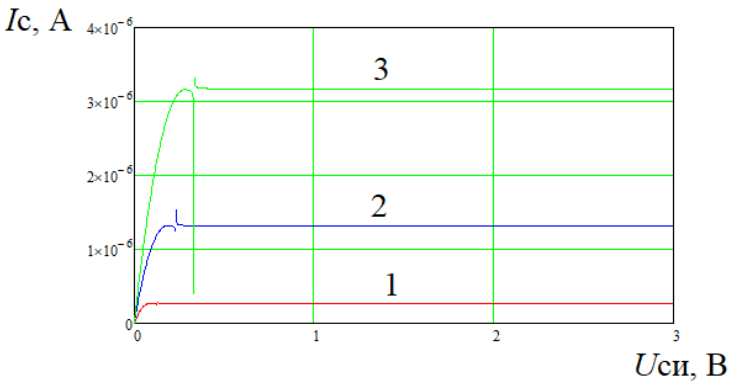
Напряжение плоских зон находится по формуле 2.22.

$$U_{\text{пл.з}} = -\frac{Q_{sc}}{C_0} - \varphi_k. \quad (2.22)$$

Напряжение плоских зон равно:

$$U_{\text{пл.з}} = -\frac{1.922 * 10^{-10}}{1.672 * 10^{-3}} + 0.46 = 0.46 \text{ В}.$$

На рисунке 2.1 представлено семейство выходных характеристик при разных напряжениях затвор-исток при температуре 300 К.

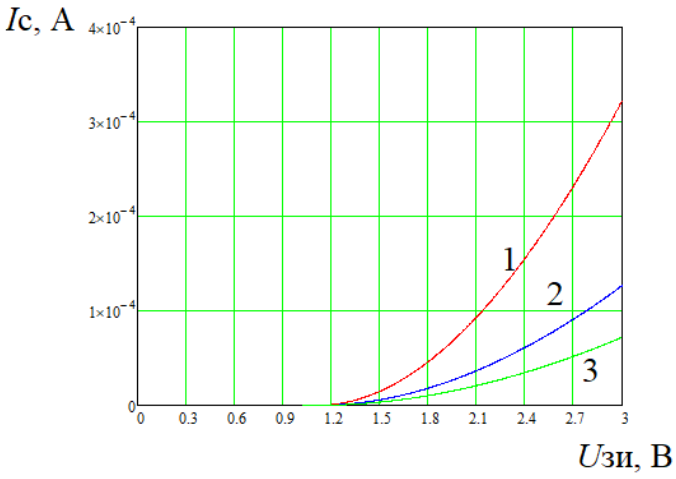


1 – при $U_{зи}$ = 1.2 В; 2 – при $U_{зи}$ = 1.3 В; 3 – при $U_{зи}$ = 1.4 В

Рисунок 2.1 – Семейство выходных характеристик при разных напряжениях затвор-исток при температуре 300 К

2.2.2 Расчет передаточных характеристик. Для этого используются формулы 2.19 – 2.24, но изменяется напряжение затвор-исток при одинаковом напряжении сток-исток.

Семейство передаточных характеристик при разных температурах и напряжении сток-исток, равном 2 В, указано на рисунке 2.2.



1 – при температуре 198 К; 2 – при температуре 300 К; 3 – при температуре 398 К.

Рисунок 2.2 – Семейство передаточных характеристик при напряжении сток-исток 2 В

2.2.3 Расчет крутизны передаточной характеристики. Крутизна передаточной характеристики разбивается на те же участки, что и ток стока.

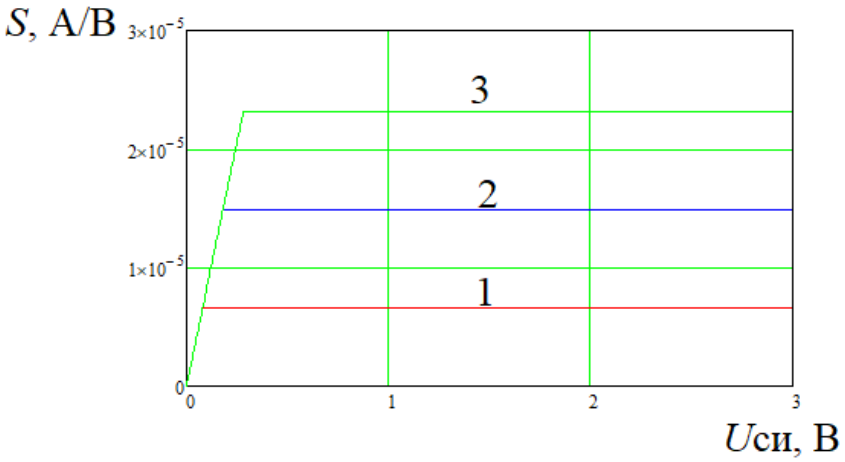
Крутизна на крутом участке находится по формуле 2.23.

$$S_{\text{перед}} = \frac{b_к}{l_к} \mu_0 (\frac{T_0}{T})^2 C_d U_{\text{си}} \quad . \tag{2.23}$$

Крутизна на пологом участке находится по формуле 2.24.

$$S_{\text{перед}} = \frac{b_к}{l_к} \mu_0 (\frac{T_0}{T})^2 C_d U_{\text{синас}} \quad . \tag{2.24}$$

Семейство крутизны передаточной характеристики при различном напряжении затвор-исток и температуре 300 К указано на рисунке 2.3.



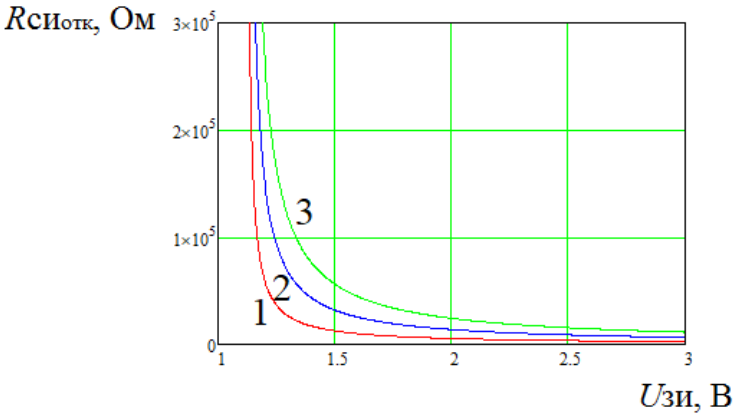
1 – при $U_{\text{зи}}$ = 1.2 В; 2 – при $U_{\text{зи}}$ = 1.3 В; 3 – при $U_{\text{зи}}$ = 1.4 В

Рисунок 2.3 – Семейство крутизны передаточной характеристики при температуре 300 К

2.2.4 Расчет сопротивления сток-исток в открытом состоянии. Сопротивление сток-исток в открытом состоянии находится по формуле 2.25.

$$R\text{си}_{\text{отк}} = \frac{l_к}{b_к * \mu_0 (\frac{T_0}{T})^2 C_d (U_{\text{зи}} - U_{\text{зипор}})} \quad . \tag{2.25}$$

Семейство сопротивления сток-исток в открытом состоянии при разных температурах указано на рисунке 2.4.



1 – при температуре 198 К; 2 – при температуре 300 К; 3 – при температуре 398 К.

Рисунок 2.4 – Семейство сопротивления сток-исток в открытом состоянии при разных температурах

2.2.5 Расчет активной составляющей выходной проводимости. Активная составляющая выходной проводимости также рассматривается для 2 участков.

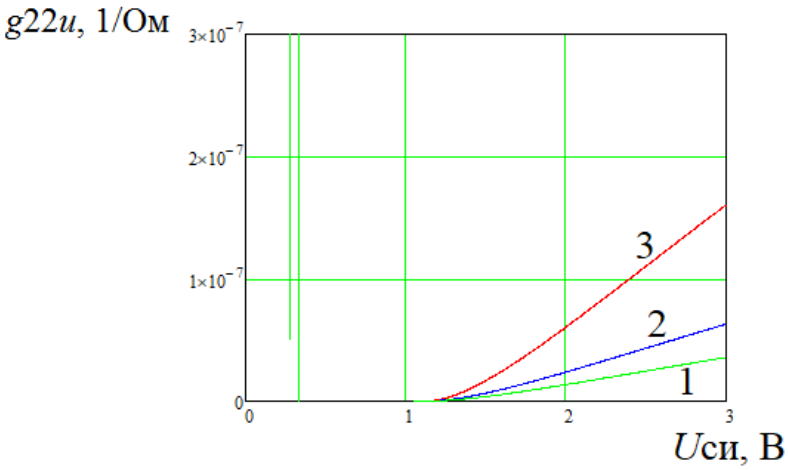
На крутом участке активная составляющая находится по формуле 2.26.

$$g22u = \mu_0 (\frac{T_0}{T})^2 \frac{b_к}{l_к} ((C_d (U_{зи} - U_{зипор}) + |Q_{sc}| - C_d U_{си} - |Q_{sc}| (1 + \frac{U_{си}}{2E_f})^{\frac{1}{2}}) \quad . \quad (2.26)$$

На пологом участке активная составляющая находится по формуле 2.27.

$$g22u = \frac{Ic_{нас}}{l_к (1 - \frac{l_{отс}}{l_к})^2} \cdot \frac{l_{отс}}{2(U_{си} - U_{синас})} \quad . \quad (2.27)$$

На рисунке 2.5 приведено семейство активной составляющей выходной проводимости при разных температурах и при $U_{зи}$ = 0.75 В.



1 – при температуре 398 К; 2 – при температуре 300 К; 3 – при температуре 198 К.

Рисунок 2.5 – Семейство активной составляющей выходной проводимости при $U_{зи}$ = 1.2 В

2.2.6 Частотные свойства. Частотные свойства МДП-транзисторов определяются в первом приближении постоянной времени перезаряда входной емкости в цепи затвор-исток. На крутом участке входная емкость определяется по формуле 2.28.

$$C_{вх} = b_к * l_к * \frac{C_0}{2}. \quad (2.28)$$

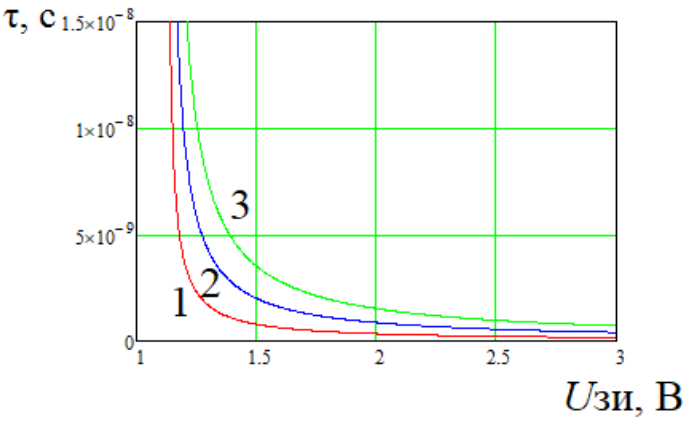
Тогда, входная емкость равна:

$$C_{вх} = 10*10^{-6}*15*10^{-6}*\frac{1.672*10^{-3}}{2} = 1.254*10^{-13}\ Ф.$$

Постоянная времени определяется по формуле 2.29.

$$\tau = \frac{Rси_{отк}}{2} * C_{вх}. \quad (2.29)$$

На рисунке 2.6 представлено семейство постоянной времени при разных температурах.



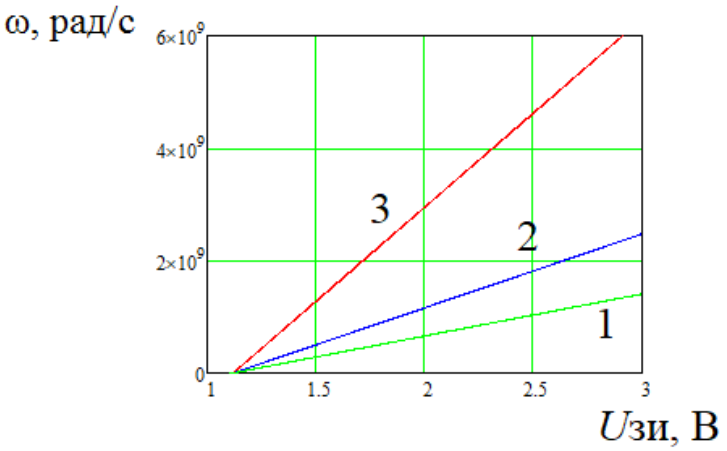
1 – при температуре 198 К; 2 – при температуре 300 К; 3 – при температуре 398 К.

Рисунок 2.6 – Семейство постоянной времени при разных температурах

Граничная частота находится по формуле 2.30.

$$\omega_{гр} = \frac{4 * \mu_0 (\frac{T_0}{T})^2 * (U_{зи} - U_{зипор})}{l_к^2} . \quad (2.30)$$

Н рисунке 2.7 представлено семейство граничных частот при разных температурах.



1 – при температуре 398 К; 2 – при температуре 300 К; 3 – при температуре 198 К.

Рисунок 2.7 – Семейство граничных частот при разных температурах

2.3 Расчет эффективной длины канала

Эффективная длина канала отличается от геометрической, так как даже в отсутствии приложенного напряжения в канале есть область объемного заряда (ООЗ) от *p-n* перехода. Если эффективная длина канала сильно отличается от геометрической, то все характеристики необходимо будет пересчитать, подставляя эффективную длина канала. Так как в данном транзисторе используется структура резко-несимметричного перехода, то, можно считать, что весь переход лежит в области канала. Толщина *p-n* перехода рассчитывается по формуле 2.31.

$$\delta_{p-n} = \sqrt{\frac{2 * \varepsilon_{SiO2} * \varepsilon_0 * |\varphi_k|}{q * N_{пр}}} . \quad (2.31)$$

Как видно из формул 2.7 и 2.8, контактная разность потенциалов зависит от температуры. На рисунке 2.8 представлена зависимость контактной разности потенциалов от температуры.

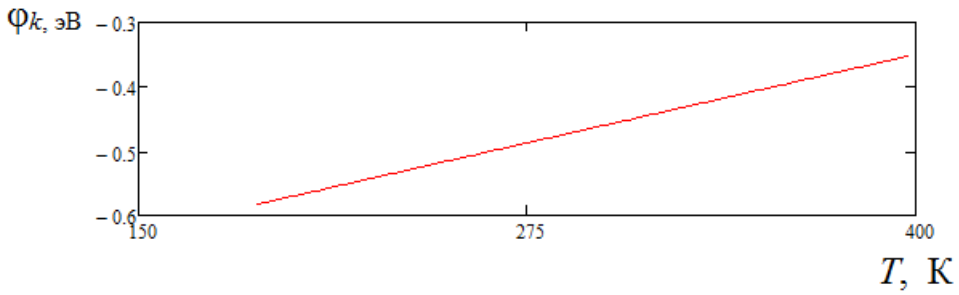


Рисунок 2.8 – Зависимость контактной разности потенциалов от температуры

На рисунке 2.9 представлена зависимость толщины *p-n* перехода от температуры.

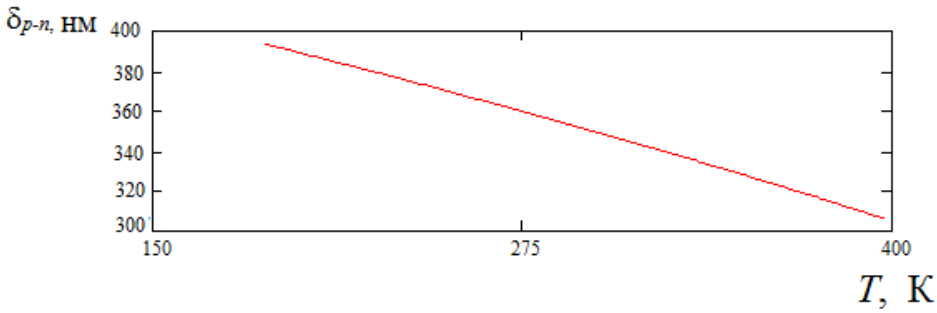


Рисунок 2.9 – Зависимость толщины *p-n* перехода от температуры

Эффективная длина канала находится по формуле 2.32.

$$l_{эф} = l_к - 2 * \delta_{p-n}. \quad (2.32)$$

Тогда, график зависимости эффективной длины канала от температуры указан на рисунке 2.10.

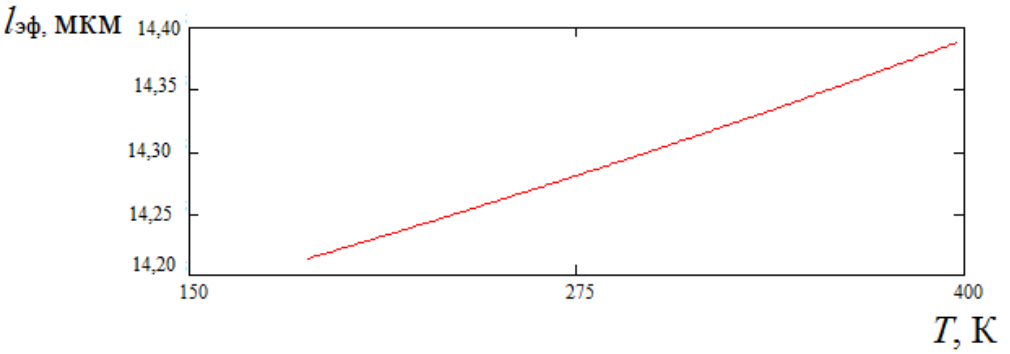


Рисунок 2.10 – График зависимости эффективной длины канала от температуры

Изменение реальной длины перехода от геометрической находится по формуле 2.33.

$$\Delta l = 100\% - \frac{l_к - l_{эф}}{l_к} * 100\%. \quad (2.33)$$

График зависимости изменения реальной длины перехода от геометрической представлен на рисунке 2.11.

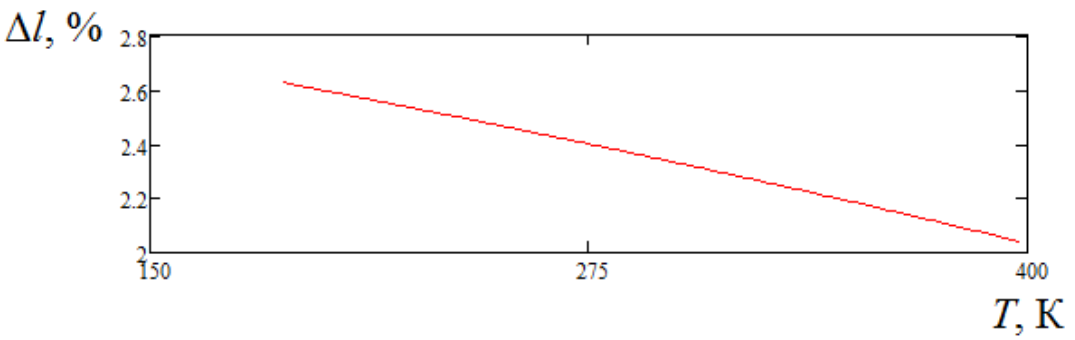


Рисунок 2.11 – График зависимости изменения реальной длины перехода от геометрической

По рисункам 2.9 – 2.11 находятся толщина перехода, эффективная длина канала и изменение реальной длины перехода от геометрической при температуре 300 К: 349.5 нм, 14.3 мкм и 2.33% соответственно.

Как видно по рисунку 2.11, изменение реальной длины перехода от геометрической не превышает 3 %, следовательно, можно производить расчёты, используя геометрическую длину канала.

3 Разработка методики измерения встроенного заряда диэлектрика и заряда поверхностных состояний полупроводника

В вычислениях, описанных ранее, при нахождении порогового напряжения МДП-транзистора не учитывался заряд поверхностных состояний полупроводника из-за того, что величину этих параметров невозможно точно вычислить на стадии разработки, так как они зависят от многих факторов: время напыления пленок, чистоты комнаты, чистоты самих напыляемых материалов и так далее. А они, в свою очередь, могут существенно изменить это напряжение. Следовательно, после расчетов без влияния этих зарядов и производстве опытных образцов, измерить эти параметры и определить их влияние.

3.1 Обзор МДП- структуры

Как и в случае барьера Штоки и *pn*-перехода, анализ поведения малосигнальной емкости МДП-структуры, измеряемой между двумя ее выходными электродами, обеспечивает ценные данные для изучения ее электрических характеристик и принципа работы. В случае МДП-структуры такой анализ сыграл главную роль в исследованиях, с помощью которых достигнут современный высокий уровень понимания свойств структур окисел – кремний и технологии их изготовления.

Сначала необходимо рассмотреть МДП-структуру с постоянным напряжением на затворе, при котором поверхность кремния находится в режиме обогащения. Для структуры на кремнии *p*-типа, например, этому режиму соответствует отрицательное напряжение на затворе. Избыточные дырки у поверхности сконцентрированы в непосредственной близости к окислу.

Если на постоянное напряжение смещения $V_з$ накладывается малое переменное напряжение $v_г$, то под его действием заряды на металлическом затворе и у поверхности кремния будут претерпевать малые изменения. Если теперь соединить такую структуру с прибором, измеряющим малосигнальную емкость, обусловленную изменениями напряжения, то результат измерения будет близок к самой емкости окисла, потому что размер области локализации модулируемого заряда в кремнии мал в сравнении с толщиной затворного окисла. Чем сильнее обогащена поверхность, тем тоньше будет этот обогащенный слой (по существу длина Дебая у поверхности за счет этих дополнительных носителей будет уменьшаться). Поэтому емкость МДП-структуры будет асимптотически стремиться к «чистой» емкости окисла. Следовательно, удельная емкость $C_д$ (на единицу площади) в режиме обогащения стремится к величине, которая вычисляется по формуле 3.1.

$$C_д = \frac{\varepsilon_д}{x_д}, \tag{3.1}$$

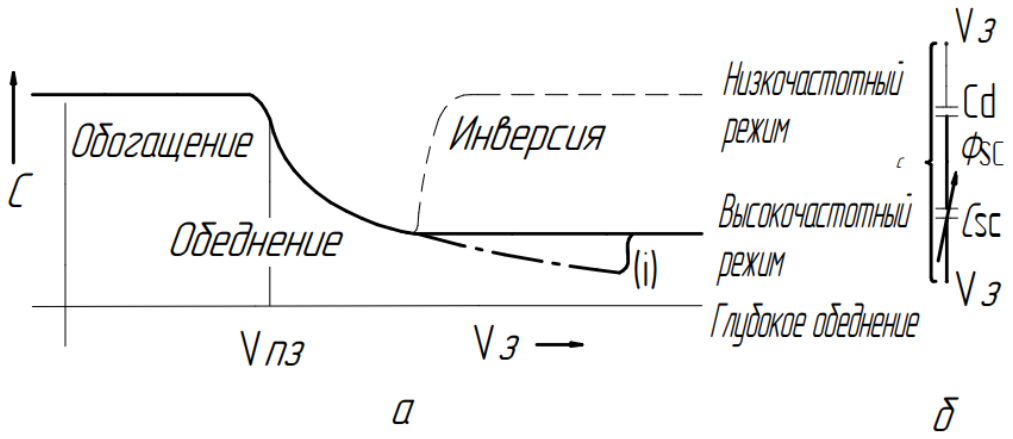
где: $x_д$ – толщина окисла. Когда напряжение на затворе меняется в направлении напряжения плоских зон, поверхностное обогащение исчезает и вследствие роста длины Дебая у поверхности емкость начинает уменьшаться. Чтобы получить точное уравнение для емкости в этом диапазоне напряжений, необходимо решить уравнение Пуассона с учетом того, что полный объемный заряд у поверхности складывается из свободных электронов, свободных дырок и примесных атомов. Такой анализ был впервые выполнен Кингстоном и Нейстадтером, и полученные ими результаты с тех пор широко используются для расчета различных электрических характеристик и параметров МДП-структур. Конкретный результат, легко выводимый из теории Кингстона - Нейстадтера, – это удельная емкость МДП- структуры в режиме $V_з = V_{пз}$. Если эту емкость обозначить $C_{пз}$. Она рассчитывается по формуле 3.2.

$$, \quad C_{пз} = \left[\frac{\varepsilon_д}{x_д} + \left(\frac{k * T}{q^2 * \varepsilon_{sc} * N_a} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{-1} = \left[\left(\frac{1}{C_д} \right) + \left(\frac{L_D}{\varepsilon_{sc}} \right) \right]^{-1}. \tag{3.2}$$

Когда напряжение на затворе становится больше напряжения плоских зон, дырки удаляются от поверхности полупроводника и структура входит в режим обеднения. С помощью относительно несложного электростатического анализа можно показать, что в этом режиме ее полная емкость состоит из последовательно соединенных емкостей окисла и приповерхностной обедненной области C_{sc}. Она находится по формуле 3.3.

$$C = \left(\frac{1}{C_д} + \frac{1}{C_{sc}}\right)^{-1} = \left(\frac{1}{C_д} + \frac{x_{sc}}{\varepsilon_{sc}}\right)^{-1} \quad (3.3)$$

где: $\frac{x_{sc}}{\varepsilon_{sc}}$ – ширина приповерхностного обедненного слоя, которая зависит как от напряжения на затворе, так и от примесной концентрации и свойств окисла. Из уравнения (3.3) следует, что с увеличеньем ширины обедненной области полная емкость МДП-структуры уменьшается, что показано на рисунке 3.1.



а – малосигнальная емкость МДП-структуры на кремнии *p*-типа; б – эквивалентная схема для определения полной емкости *C*

Рисунок 3.1 – Зависимость полной емкости МДП-структуры от напряжения на затворе

Когда напряжение на затворе достаточно велико для инверсии поверхности, для описания поведения емкости МДП-структуры следует ввести в рассмотрение новую особенность. Инверсный слой у поверхности МДП-структуры возникает в результате генерации неосновных носителей. Следовательно, популяция

носителей в инверсном слое может меняться только с той скоростью, с которой в обеднелой приповерхностной области происходит генерация носителей. Вследствие этого ограничения результаты измерения малосигнальной емкости МДП-структуры зависят от частоты сигнала переменного тока, с помощью которого она измеряется.

В простейшем случае постоянное напряжение смещения и измерительное малосигнальное напряжение меняются очень медленно, так что кремний всегда успевает достичь равновесного состояния. В этом случае частота сигнала достаточно мала, так что изменение популяции носителей в инверсном слое успевает следовать за пим. В таком режиме емкость МДП-структуры есть емкость, определяемая накоплением зарядов с обеих сторон окисла, и поэтому она примерно равна $C_д$.

График зависимости измеряемой емкости от напряжения смещения на затворе для этого случая имеет вид, показанный на рисунке 3.1 штриховой линией и помеченный словами низкочастотный режим; он начинается с $C_д$. в режиме обогащения, спадает при появлении у поверхности обедненной области и возвращается к уровню $C_д$ когда происходит инверсия поверхности. Характеристическое время, определяющее образование инверсного слоя в МДП-структуре, смещенной в инверсный режим, составляет по порядку величины $\frac{2 * N_a * \tau_0}{n_i}$, где τ_0 – время жизни неосновных носителей у поверхности. Для типовых значений времени жизни (1 мкс) и примесных концентраций (10^{15} см$^{-3}$) это время ориентировочно равно 0,2 с. Следовательно, для получения низкочастотной *C*-*V*-характеристики МДП-структуры (штриховая линия на рисунке 3.1) малосигнальное измерительное напряжение должно меняться очень медленно.

Некоторыми методами, например освещением поверхности, способным повысить скорость поверхностной генерации носителей, можно расширить диапазон наблюдения низкочастотных *C*-*V*-характеристик.

Если обеспечить омический контакт между инверсным слоем и некоторой областью, с которой он может обмениваться электронами, то такую низкочастотную *C*-*V*-характеристику можно будет наблюдать даже в мегагерцовом диапазоне. Дело в том, что теперь электроны инверсного слоя можно быстро подавать и удалять через этот омический контакт.

Қогда измерительный сигнал переменного тока меняется быстро, а постоянное напряжение смещения – медленно, инверсный слой не может реагировать на измерительный сигнал. В этом случае будет модулироваться величина заряда в области объемного заряда в кремнии за счет перемещения дырок у дальней границы обедненной области. В таком режиме емкость соответствует последовательному соединению емкостей окисла и обедненной области, как и при напряжениях, соответствующих режиму обеднения. Но так как при входе МДП-структуры в режим сильной инверсии толщина обедненной области достигает максимума $x_{sc\max}$, то измеряемая емкость в этом случае соответствует последовательно соединенным емкостям окисла и обедненной области максимальной ширины. С ростом напряжения смещения измеряемая емкость будет оставаться постоянной. Такая высокочастотная *C*-*V*-характеристика показана на рисунке 3.1 сплошной линией. И еще одна *C*-*V* -характеристика показана на рисунке 3.1. Речь идет о штрихпунктирной кривой, которая обозначена словами глубокое обеднение.

Она соответствует такому режиму измерений, когда и затворное напряжение смещения, и малосигнальное измерительное напряжение меняются быстрее, чем происходят процессы генерации носителей в приповерхностном обедненном слое. Поскольку в этом случае инверсный слой вообще не образуется, ширина обедненной области становится больше $x_{sc\max}$, поэтому термин «глубокое обеднение» описывает данный режим надлежащим образом. Емкость МДП-структуры в этом режиме определяется уравнением (3.3), как и в обычном режиме обеднения; однако в данном случае x_{sc} превышает величину $x_{sc\max}$, соответствующую режиму инверсии, и емкость *C* не имеет минимума, Один из способов получения *C*-*V* -характеристики для глубокого обеднения – это подача

на затвор напряжения $V_з$ в виде низкочастотного треугольного периодического сигнала, на который наложен синусоидальный измерительный сигнал переменного тока.

Однако с увеличением ширины обедненного слоя скорость генерации носителей возрастает, поэтому часто *C*-*V*-характеристика для режима глубокого обеднения при повышенных напряжениях смещения возвращается к высокочастотной *C*-*V*-характеристике. Такое возвращение схематически показано на характеристике глубокого обеднения на рисунке 3.1 в точке *i*.

3.2 Теория вольт-фарадных характеристик МДП- транзистора

Рассмотрим МДП-структуру с единичной площадью с омическим или антизапорным контактом к полупроводнику, к которой приложено малое переменное напряжение $\Delta V = \Delta\tilde{V} * \exp(j * \omega * t)$, где ω – круговая частота модуляции. Часть этого напряжения ΔV_d падает на слое диэлектрика, а часть ΔV_s – на пластине полупроводника между её поверхностями. Напряжение ΔV_s, в свою очередь, может быть представлено суммой падений напряжения непосредственно на ОПЗ полупроводника (ΔV_1) и на его квазинейтральном объёме (ΔV_b). Далее мы ограничимся случаями, когда падением напряжения ΔV_b можно пренебречь по сравнению с ΔV_1. На низких частотах это можно сделать всегда, а на высоких – для достаточно тонких пластин полупроводников. Последнее относится, в частности, к эпитаксиальным слоям полупроводников с заданным уровнем легирования и толщиной в несколько десятков микрометров, выращенным на том же материале с высокой проводимостью.

Падение напряжения ΔV_1 определяет переменную добавку к поверхностному изгибу зон $y_1 = \tilde{y}_1 exp(j\omega t)$, где $\tilde{y}_1 = \Delta\tilde{V}\frac{q}{kT} \ll 1$, а изгиб зон в целом находится по формуле 3.4.

$$y_s = y_{s0} + y_1 \exp(j\omega t), \tag{3.4}$$

где: y_{s0} – равновесное значение поверхностного изгиба зон.

Здесь равновесное значение поверхностного изгиба зон y_{s0} определяется, в частности, заданной величиной постоянного управляющего напряжения.

Основой для дальнейшего анализа являются формулы 3.5 и 3.6.

$$\Delta V = \Delta V_d + \Delta V_1; \tag{3.5}$$

$$\Delta Q_{\text{М}} + \Delta Q_{sc} + \Delta Q_t = 0, \tag{3.6}$$

где: $\Delta Q_{\text{М}}$ – изменение заряда на управляющем электроде; ΔQ_{sc} – изменение заряда в области пространственного заряда (ОПЗ); ΔQ_t – изменение заряда поверхностных состояний (ПС)

Рассмотрим два предельных случая так называемых «низких» и «высоких» частот измерительного сигнала.

Низкие частоты

Низкими называют частоты, при которых концентрации носителей зарядов в зонах и на уровнях в запрещённой зоне полупроводника, включая ПС, в любой момент времени t с большой степенью точности совпадают со своими равновесными значениями. Это справедливо при достаточно медленных изменениях: поверхностного потенциала, когда генерационно-рекомбинационные процессы практически успевают устанавливать термодинамическое равновесие между концентрациями носителей заряда на любых уровнях и в любой точке образца. В этом случае изгиб зон y_s в любой момент времени является квазиравновесным, а изменения зарядов ΔQ_{sc} и ΔQ_t входящие в равенство 3.6, представляют собой квазиравновесные изменения зарядов $Q_{sc}(y_{s0})$ и $Q_t(y_{s0})$.

Разделив равенство 3.5 на изменение зарядов $\Delta Q_{\text{М}} = -\Delta Q_{sc} - \Delta Q_t$, получим равенство, представленное формулой 3.7

$$\frac{\Delta V}{\Delta Q_{\text{М}}} = \frac{\Delta V_d}{\Delta Q_{\text{М}}} - \frac{\Delta V_1}{\Delta Q_{sc} + \Delta Q_t} \tag{3.7}$$

Воспользуемся определениями дифференциальных ёмкостей ОПЗ C_{sc}, ПС C_t и равенствами, получим формулу 3.8:

$$C = \frac{\Delta Q_{\text{М}}}{\Delta V} \text{ и } C_d = \frac{\Delta Q_{\text{М}}}{\Delta V_d}, \tag{3.8}$$

где: C – малосигиальная ёмкость МДП-конденсатора.

Формула 3.7 приобретет вид формулы 3.9, а.

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_d} + \frac{1}{C_{sc} + C_t}. \qquad (3.9, а)$$

Или формулы 3.9, б.

$$C = \frac{C_d * (C_{sc} + C_t)}{C_d + C_{sc} + C_t}. \qquad (3.9, б)$$

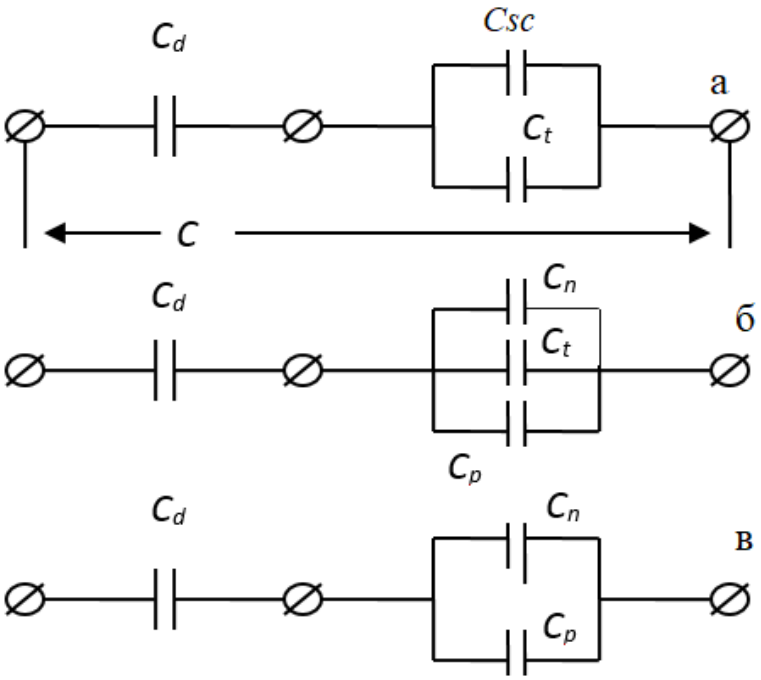
Таким образом, если известны температура образца, уровень легирования полупроводника, распределение ПС по энергиям и ёмкость диэлектрического слоя, по соотношению 3.9, б может быть рассчитана зависимость малосигиальной ёмкости МДП-конденсатора C от величины равновесного поверхностного потенциала полупроводника y_{s0}.

Каждое значение y_{s0} однозначно связано с величиной постоянного управляющего напряжения $V_з$. Зависимость дифференциальной ёмкости МДП-конденсатора C от величины управляющего напряжения $V_з$ называют его вольт-фарадной характеристикой (ВФХ). Экспериментально измеряемыми являются именно ВФХ МДП-структур.

Соотношения 3.9, а, б определяют ёмкость схемы, в которой последовательно с конденсатором C_d соединены параллельно включенные конденсаторы C_{cs} и C_t, что представлено на рисунке 3.2. Данная схема является эквивалентной схемой МДП-конденсатора на низких частотах.

Эта схема правильно отражает распределение напряжения ΔV: часть напряжения ΔV_d падает на конденсаторе C_d, часть ΔV_1 – на параллельно включенных конденсаторах C_{sc} и C_t.

Заряд на левой обкладке конденсатора C_d соответствует изменению заряда на управляющем электроде (ΔQ_M), а заряды на правых обкладках конденсаторов C_{sc} и C_{t0} – изменениям зарядов в ОПЗ (Q_{sc}) и в ПС (ΔQ_t). Все внутренние обкладки конденсаторов C_d, C_{sc} и C_t соответствуют поверхности полупроводника, однако заряды на них физического смысла не имеют.



а – при наличии ПС; б – при наличии ПС и расписанной на составные части C_{sc}; в – при отсутствии ПС.

Рисунок 3.2 – Эквивалентные схемы МДП-структуры на низких частотах

Поскольку ёмкость ОПЗ C_{sc} является суммой ёмкостей электронного и дырочного зарядов в ОПЗ, конденсатор на эквивалентной схеме, рисунок 3.2,а может быть представлен параллельным соединением конденсаторов C_n *и* C_p, рисунок 3.2, б. Одновременный учёт обеих ёмкостей C_n и C_p требуется только при значениях y_s, близких к инверсионному; в режимах сильной инверсии и обогащения одной из ёмкостей C_n или C_p можно пренебречь.

При отсутствии ПС $C_t = 0$, эквивалентная схема МДП-конденсатора приобретает предельно простой вид, приведенный на рисунке 3.2, в.

Высокие частоты

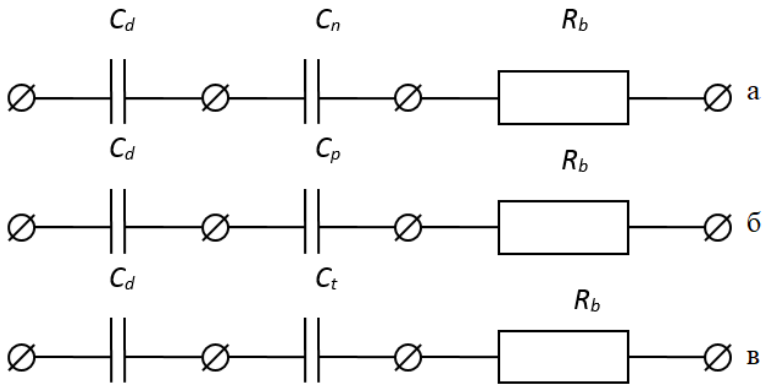
Высокими называют частоты, при которых за время порядка полупериода сигнала практически не изменяются:

а) полная концентрация неосновных носителей заряда на единицу площади образца из-за генерационно-рекомбинационных процессов;

б) концентрация зарядов в ПС из-за захвата или термического выброса носителей зарядов в разрешенные зоны полупроводника.

Эти два условия соответствуют одновременному выполнению неравенств $\omega\tau_0 >> 1$ и $\omega\tau_t >> 1$, где τ_0 – некоторое эффективное время жизни носителей заряда в пластине полупроводника, а τ_t – некоторое характерное время установления квазиравновесия между ПС и разрешенными зонами. При выполнении последнего условия заполнение ПС всегда соответствует равновесному при заданной величине изгиба зону y_{s0}, а неизменность этого заполнения на переменном сигнале означает равенство нулю дифференциальной ёмкости ПС. В то же время частота сигнала не должна быть слишком большой, так чтобы максвелловское время релаксации было много меньше единицы для нейтрального объёма полупроводника. Выполнение данного условия означает, что МДП-конденсатор за время порядка полупериода сигнала успевает зарядиться, а ОПЗ сформироваться.

Эквивалентная схема МДП-конденсатора высоких частотах приведена на рисунке 3.3.



а – при неинверсионных изгибах зон *n*-полупроводника; б – для *p*-полупроводника; в – в режиме инверсии.

Рисунок 3.3 – Эквивалентные схемы МДП-структуры на высоких частотах

Ограничимся полупроводниками при $\lambda >> 1$ или $\lambda^{-1} >> 1$. Для них в области высоких частот зависимость ёмкости МДП-конденсатора ох поверхностного изгиба зон может быть разбита на два диапазона.

В диапазоне поверхностных потенциалов вне инверсионных значений неосновными носителями заряда в ОПЗ вообще можно пренебречь и полагать $Q_{sc} = Q_n$ в *n*-полупроводнике и $Q_{sc} = Q_p$ в *p*-полупроводнике. С учётом этого обстоятельства и условия $\Delta Q_t = 0$ вместо формулы 3.7 получается формула 3.10:

$$\frac{\Delta V}{\Delta Q_{\text{M}}} = \frac{\Delta V_d}{\Delta Q_{\text{M}}} - \frac{\Delta V_1}{\Delta Q_{n,p}}, \qquad (3.10)$$

где: $Q_{n,p}$ –изменение заряда в ОПЗ, связанного с основными носителями заряда. В результате ёмкость МДП-конденсатора будет определена равенством 3.11, а:

$$C = \frac{C_d * C_n}{C_d + C_n}, \qquad (3.11, \text{а})$$

для *n*-полупроводника и равенством 3.11, б:

$$C = \frac{C_d * C_p}{C_d + C_p}, \qquad (3.11, \text{б})$$

для *p*-полупроводника.

Таким образом, в области изменений поверхностного потенциала от произвольного обогащения до слабой инверсии ОПЗ ёмкость МДП-конденсатора с полупроводником на высокой частоте совпадает с ёмкостью этого же МДП-конденсатора на низкой частоте без учёта ПС. Эквивалентная схема МДП-конденсатора на высокой частоте для данного диапазона изменения y_s приведена на рисунке 3.3, *а, б.*

Рассмотрим теперь область потенциалов, соответствующих сформированному инверсионному слою на поверхности полупроводника. Согласно определению, заряд в инверсионном слое на высокой частоте остается неизменным, а заряд в ОПЗ на переменном сигнале изменяется за счет заряда в слое обеднения на величину Q_W, которая обусловлена соответствующим изменением толщины слоя обеднения на каждый полупериод переменного сигнала и однозначно связана с падением переменного напряжения $\Delta V_1 = \Delta V_W$ на этом слое.

Отношение $\frac{\Delta Q_W}{\Delta V_W}$, взятое с обратным знаком, определяет соответствующую высокочастотную ёмкость ОПЗ C_i при инверсионных изгибах зон, что указано в формуле 3.12

$$C_i = -\frac{\Delta Q_W}{\Delta V_W} = \varepsilon^* \varepsilon_0 * W_\infty, \quad (3.12)$$

где: W_∞ определено равенством 3.13.

$$W_\infty = L_Д * \int_{y_s}^{0} \frac{dy}{F(y)} \quad (3.13)$$

Система равенств 3.5 и 3.6 для рассматриваемого случая может быть переписана в виде равенств 3.14, а, б.

$$\Delta V = \Delta V_d + \Delta V_W; \quad (3.14, а)$$

$$\Delta Q_M + \Delta Q_W = 0. \quad (3.15, б)$$

Разделив первое равенство па изменение зарядов $\Delta Q_M = -\Delta Q_W$ и используя формулы 3.8 и (3.12), для ёмкости МДП-структуры получим формулу 3.15

$$C = \frac{C_d * C_i}{C_d + C_i}. \quad (3.15)$$

Эквивалентная схема МДП-конденсатора для высоких частот при инверсии ОПЗ представляет собой два последовательно соединенных конденсатора C_i и C_d, рисунок 3.3, б. Ёмкость МДП-структуры при инверсии ОПЗ от поверхностного изгиба зон не зависит.

Вид качественных зависимостей $C(y_s)$ на низкой (НЧ) и высокой (ВЧ) частотах измерительного сигнала для идеальной МДП-структуры показан на рисунке 3.4. Точками на ВЧ-зависимости $C(y_s)$ показан участок кривой в переходной области между сильным обеднением и инверсией ОПЗ, исключаемый из анализа. Полная зависимость ВЧ-ёмкости полупроводника от поверхностного изгиба зон может быть определена равенством 3.16

$$C_s = C_n + C_1 + C_p * (C_1 + C_p)^{-1}. \quad (3.16)$$

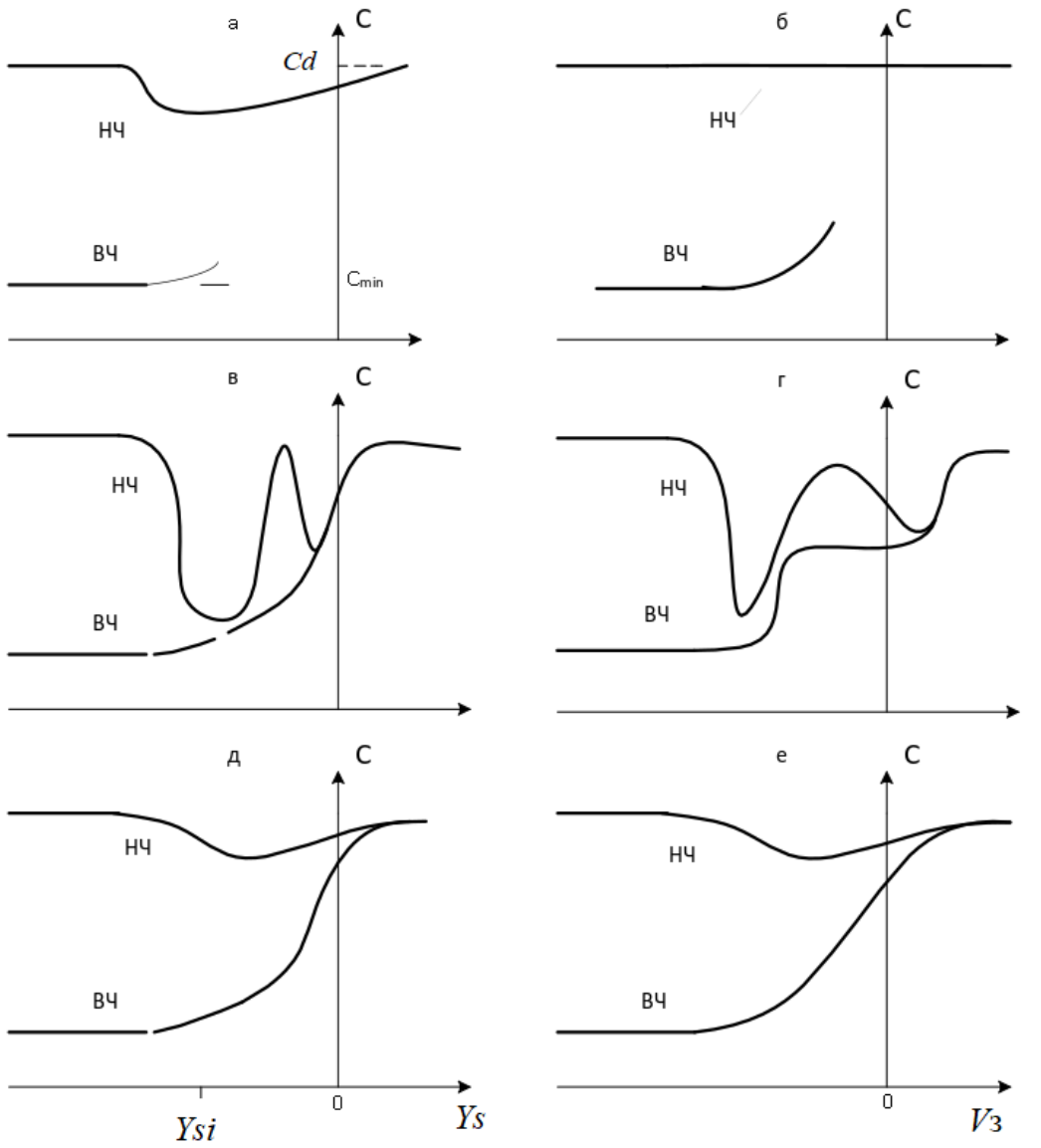
При наличии ПС ВЧ-зависимости $C(y_s)$ изменяют свой вид. Моноэнергетические ПС приводят к появлению па них соответствующего максимума, рисунок 3.4, в, а ПС с квазинепрерывным распределением по энергиям – к увеличению ёмкости МДП-структуры при всех значениях y_s, рисунок 3.4, д.

Поскольку на высокой частоте вклад ПС в ёмкость полупроводника отсутствует, ВЧ-зависимость $C(y_s)$ остается без изменений при любых энергетических распределениях ПС, рисунок 3.4, а, б, д.

ВФХ МДП-структур для этих же случаев показаны на рисунке 3.4 б, г, е. НЧ ВФХ повторяют все особенности ВЧ-зависимостей $C(y_s)$, однако сами кривые не являются подобными в силу нелинейной зависимости $y_s(V_з)$.

Рассмотрим деформацию ВЧ ВФХ при наличии поверхпостных состояний. В случае моноэнергетических ПС на ВЧ ВФХ появляется «ступенька» при тех значениях $V_з$, для которых уровень Ферми на поверхности полупроводника совпадает пли близок к их энергетическому положению. Изменение ВЧ-ёмкости здесь как бы «затормаживается», поскольку часть индуцируемого напряжением V_s заряда уходит в связанное состояние в ПС.

В случае ПС с квазинепрерывным энергетическим распределением растяжение ВЧ ВФХ по оси напряжений происходит монотонно. Но во всех случаях эта деформация связана только с той или инойскоростью изменения y_s при изменении $V_з$. ВЧ-ёмкость $C(y_s)$ при любом смещении $V_з$ обусловлена только ёмкостью ОПЗ полупроводника без участия ПС, именно это обстоятельство позволяет для каждого измеренного значения $C(V_s)$ в области изменения ёмкости МДП-структуры от максимальной величины C_d до минимальном C_1 вычислять соответствующие y_s.



а, б – при отсутствии ПС; в, г – при наличии моноэнергетических ПС; д, е – при наличии квазинепрерывного распределения ПС

Рисунок 3.4 – Зависимости ёмкости МДП-структуры от поверхностного изгиба зон y_s и от управляющего напряжения $V_з$ на низких (НЧ) и высоких (ВЧ) частотах измерительного сигнала для *n*-полупроводника

При низких, а также при высоких частотах измерительного сигнала, когда влиянием перезарядки ПС на сдвиг фаз между переменным сигналом и током через МДП-структуру можно пренебречь, измерение ВФХ МДП-структур можно проводить, используя их полную проводимость.

Если высокочастотная ВФХ МДП-структуры каким-либо способом измерена, она позволяет определить такие параметры полупроводника, как тип его проводимости, концентрацию легирующей примеси в приповерхностном

слое, а также зависимость поверхностного изгиба зон от управляющего напряжения $y_s(V_з)$. Экспериментально определенная зависимость y_s позволяет далее найти кривую захваченного заряда и вытекающее из неё энергетическое распределение ПС. Но эта зависимость имеет и более общее значение, поскольку является необходимой для количественных исследований любых электрофизических пли фотоэлектрических явлений в приповерхностных слоях полупроводников.

Тип проводимости полупроводника определяется из того факта, что при измерении ВФХ обогащение ОПЗ и выход на ёмкость диэлектрика происходят при разных направлениях изменения управляющего напряжения: при положительных для полупроводников *n*-типа и отрицательных для полупроводников *p*-типа, рисунок 3.5.

Концентрация легирующей примеси N и связанный с ней параметр λ, входящий во все параметры ОПЗ, могут быть определены по величине инверсной ёмкости полупроводника C_i, которая получается из ВЧ ВФХ по соотношению 3.17.

$$C_i = \frac{C_d * C_{\min}}{C_d - C_{\min}}. \qquad (3.17)$$

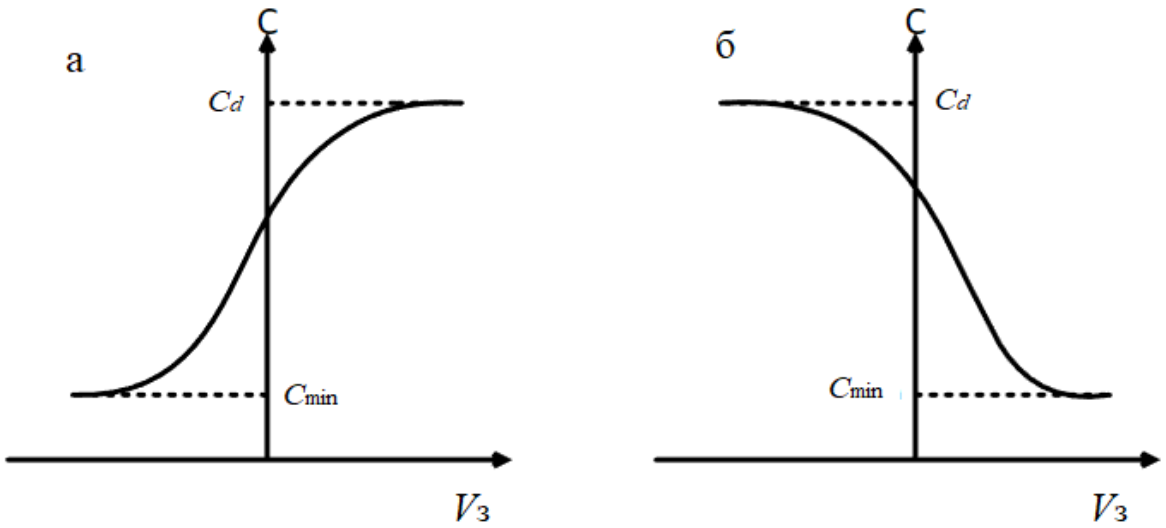
С другой стороны, для каждого данного полупроводника при определенной температуре T существует однозначная теоретическая зависимость $C_i(N)$, которая может быть построена либо по точной формуле 3.17, либо по приближенной – 3.18

$$C_i = \sqrt{\frac{q * \varepsilon_0 * \varepsilon_s * N}{2 * |V_{si}|}}, \qquad (3.18)$$

где $|V_{si}|$ – предельное размерное значение потенциала, падающего на слое обеднения полупроводника W_∞, отделяющего инверсный слоя от его нейтрального объёма. Оно находится по формуле 3.19

$$|V_{si}| = \frac{k * T}{q}[\ln(\frac{N}{n_i})^2 + \ln(\ln(\frac{N}{n_i})^2)]. \qquad (3.19)$$

С ростом N ёмкость C_i возрастает $\sim\sqrt{N}$.



а – для полупроводника *n* – типа; б – для полупроводника *p* – типа

Рисунок 3.5 – ВЧ ВФХ для полупроводника

Зависимость $y_s(V_з)$ может быть построена по значениям ВЧ-ёмкости полупроводника в МДП-структуре в области тех значений управляющего напряжения, где ёмкость МДП-структуры C изменяется с изменением $V_з$ от максимального значения C_d до минимального $C_{\min}$ (этот участок ВФХ иногда называют областью модуляции ёмкости управляющим напряжением). Пользуясь зависимостью или таблицей значений $C_{sc}(y_s)$, которые становятся однозначными после определения концентрации легирующей примеси и параметра λ, и найденной величиной C_d, можно рассчитать значения ёмкости МДП-конденсатора для ряда значений y_s, взятых с определенным шагом, по формуле 3.20

$$C(y_s) = \frac{C_d * C_{n,p}(y_s)}{C_d + C_{n,p}(y_s)}, \qquad (3.20)$$

где: берется ёмкость C_n или C_p в зависимости от типа проводимости полупроводника.

Поскольку каждому значению ёмкости МДП-структуры соответствует определенная величина управляющего напряжения, зависимость $y_s(V_з)$ становится известной. После расстановки значении y_s на ВЧ ВФХ (эту операцию называют «калибровкой» ВФХ по величине поверхностных потенциалов) становятся известными напряжения $V_з$, требуемые для задания определенной величины

поверхностного изгиба зон. Однако этим способом нельзя определять значения y_s в области сильного обогащения или инверсии, где ёмкость МДП-структуры от $V_з$ не зависит. При необходимости здесь должны быть использованы другие методы (например, поверхностный потенциал полупроводника при инверсионных изгибах зон может быть измерен по величине поверхностной проводимости инверсионных каналов в полевых транзисторах).

Отметим, что в МДП-структурах с монополярными полупроводниками и толщинами диэлектрических слоев ~ 1000 Å основная область модуляции ВФХ управляющим напряжением приходится на изгибы зон в области обеднения. При переходе к обогащению ОПЗ точность определения ёмкости полупроводника и величин поверхностного изгиба зон быстро уменьшается, поскольку становится весьма зависимой от точности определения ёмкости диэлектрического слоя. Однако диапазон точно определяемых значений у может быть расширен при использовании тонких диэлектрических слоев с толщиной в несколько десятков ангстрем.

Зависимость $C(V_з)$ в области обеднения МДП-структуры может быть использована для контрольного определения концентрации легирующей примеси. Поскольку здесь $C_{n,p}$ находится по формуле 3.21.

$$C_{n,p} = \sqrt{\frac{q * \varepsilon_0 * \varepsilon_s * N}{2 * |V_{sc}|}}, \qquad (3.21)$$

где: $V_{sc} = \frac{k * T}{q} * y_s$, наклон зависимости $C^{-2}_{n,p}(y_s)$ однозначно связан с N.

Основным фактором, осложняющим определение зависимости $y_s(V_з)$ и вытекающих из нее других параметров полупроводника, является неоднородность поверхностного потенциала вдоль границы полупроводника и диэлектрика. Эта неоднородность обусловлена флуктуациями продольных распределений встроенного заряда, ПС и легирующей примеси и особенно существенна при измерениях $y_s(V_з)$ именно при обеднении ОПЗ. Эта проблема, в силу её практической важности, привлекает большое внимание.

3.3 Методика измерения заряда поверхностных состояний полупроводника

Рассмотрим определение энергетического распределения ПС по высокочастотным ВФХ, прокалиброванным по величине поверхностных изгибов зон.

При изменении управляющего напряжения от $V_{ПЗ}$ до некоторого другого значения $V_з$ в полупроводнике индуцируется заряд ($\Delta Q_{ИНД}$), рассчитывающий по формуле 3.22.

$$\Delta Q_{ИНД} = Q_{sc}(y_s) + Q^0{}_t(y_s). \quad (3.22)$$

С другой стороны, это изменение индуцированного заряда составляет величину, получаемую по формуле 3.23.

$$\Delta Q_{ИНД} = -C_d \Delta V_d = -C_d * (V_З - V_{ПЗ} - \frac{k*T}{q} * y_s). \quad (3.23)$$

Приравнивая правые части равенств 3.22 и 3.23, получим формулу 3.24

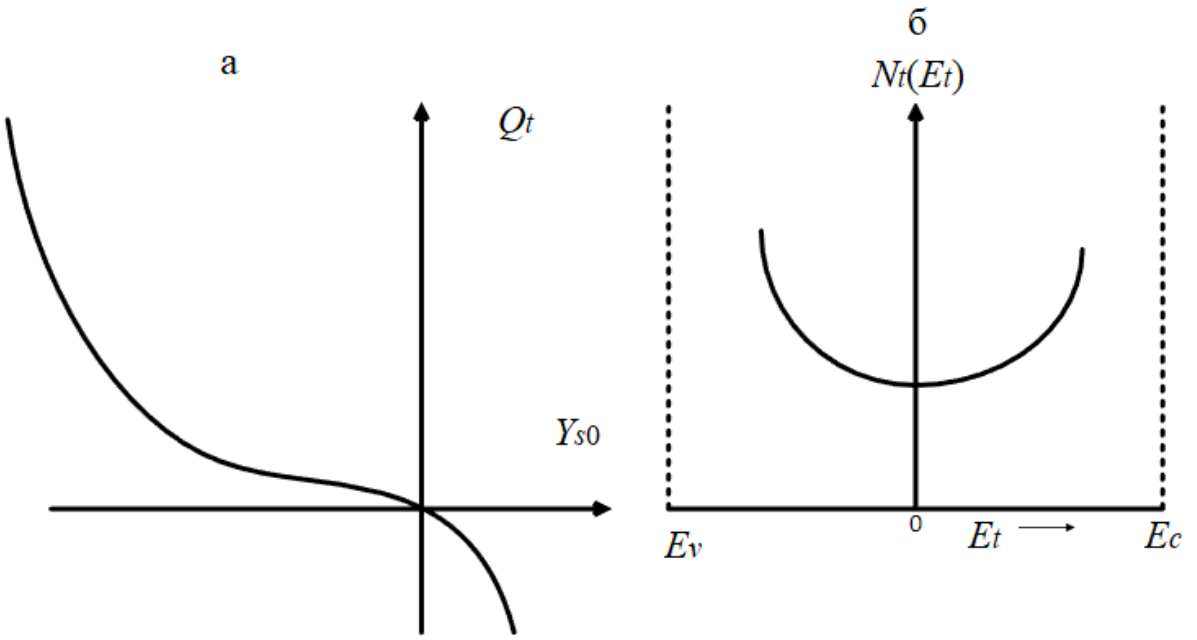
$$\Delta Q_t^0 = -C_d * (V_З - V_{ПЗ} - \frac{k*T}{q} * y_s - Q_{sc}(y_s)). \quad (3.24)$$

Его смысл сводится к тому, что изменение заряда в ПС равно разности между изменением индуцированного заряда и изменением заряда непосредственно в ОПЗ полупроводника.

Может быть построена так называемая кривая захваченного заряда $\Delta Q_t^0(y_s)$, графическое дифференцирование которой по y_s дает распределение ПС в виде $N_t(y_s) = -q^{-1} * \frac{dQ_t^0}{dy_s}$. Оно соответствует средним величинам $N_t(\varepsilon_t)$ с энергиями ε_t вблизи уровня Ферми η_s на поверхности полупроводника. В связи с этим от зависимости $N_t(y_s)$ можно перейти к $N_t(E_t)$ сопоставив каждому значению y_s величину, которая находится по формуле 3.25

$$E_t = \frac{k*T}{q} * (y_s - \ln(\lambda)). \quad (3.25)$$

Характерные качественные зависимости $\Delta Q_t^0(y_s)$ и $N_t(E_t)$, наиболее часто получаемые на реальных МДП-структурах, показаны на рисунке 3.6.



а – вид кривой качественной зависимости захваченного заряда; б – энергетическое распределение ПС

Рисунок 3.6 – Характерные качественные зависимости $\Delta Q_t^0(y_s)$ и $N_t(E_t)$, наиболее часто получаемые на реальных МДП-структурах

Указанные здесь значения E_c и E_v представляют собой границы запрещённой зоны полупроводника, которые определяются по формуле 3.26.

$$E_c = \frac{\Delta E_g}{2} + \frac{k*T}{2*q} * \ln(\frac{N_c}{N_v}) \text{ и } E_v = -\frac{\Delta E_g}{2} + \frac{k*T}{2*q} * \ln(\frac{N_c}{N_v}). \qquad (3.26)$$

Если на поверхности полупроводника имеются моноэнергетические ПС, то кривая захваченного заряда будет содержать особенность, соответствующую вкладу в неё компонент $Q_t(y_s)$ типа, показанных на рисунке 3.7. Вклад этих компонент пропорционален кривой фермиевского распределения; в данном случае плотность состояний и их энергетическое положение могут быть найдены непосредственно из амплитуды и положения «ступеньки» на кривой захваченного заряда, а вычисление величины N_t не требует её дифференцирования. Отсюда же вытекает, что операция дифференцирования для определения плотности ПС

справедлива, если скорость изменения заряда $\Delta Q_t^0(y_s)$, намного слабее зависимости exp(|y_s|) (например, Q_t^0~ exp(y_s/2)).

Для полноценного расчёта ёмкостных и транзисторных МДП-структур необходимо определение энергетического распределения поверхностных состояний по температурной зависимости напряжения плоских зон.

В широком интервале температур от комнатной до температуры ниже азотной во многихполупроводниках концентрация основных носителей заряда практически постоянна и равна концентрации полностью ионизованной легирующей примеси. В этом случае для положения уровня Ферми в размерных единицах для объёма *n*-полупроводника будет находится по формуле 3.27, а:

$$E_F = k * T * \ln(\frac{N_d}{n_i}), \qquad (3.27, а)$$

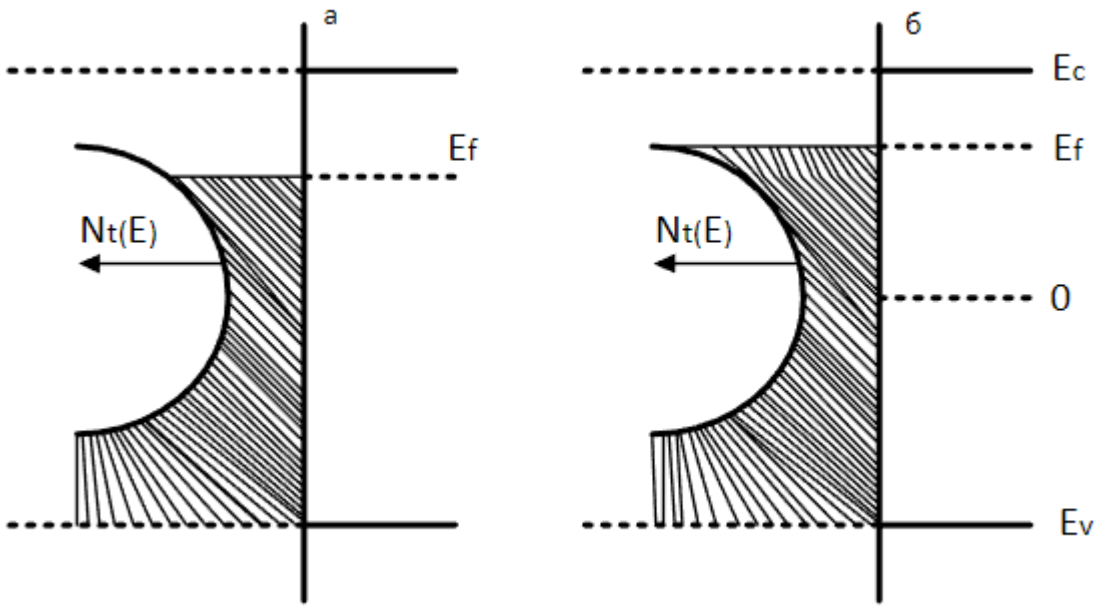
а для объёма *p*-полупроводника – по формуле 3.27, б:

$$E_F = -k * T * \ln(\frac{N_a}{n_i}). \qquad (3.27, б)$$

При температурах ниже комнатной удобнее могут оказаться соответственно равенства 3.28, а, б.

$$E_c - E_F = k * T * \ln(\frac{N_c}{N_d}); \qquad (3.28, а)$$

$$E_F - E_v = k * T * \ln(\frac{N_v}{N_a}). \qquad (3.28, б)$$



а – для температуры T_0; б – для температуры $T_0 > T$

Рисунок 3.7 – Приповерхностная область полупроводника *n*-типа при плоских зонах для двух температур

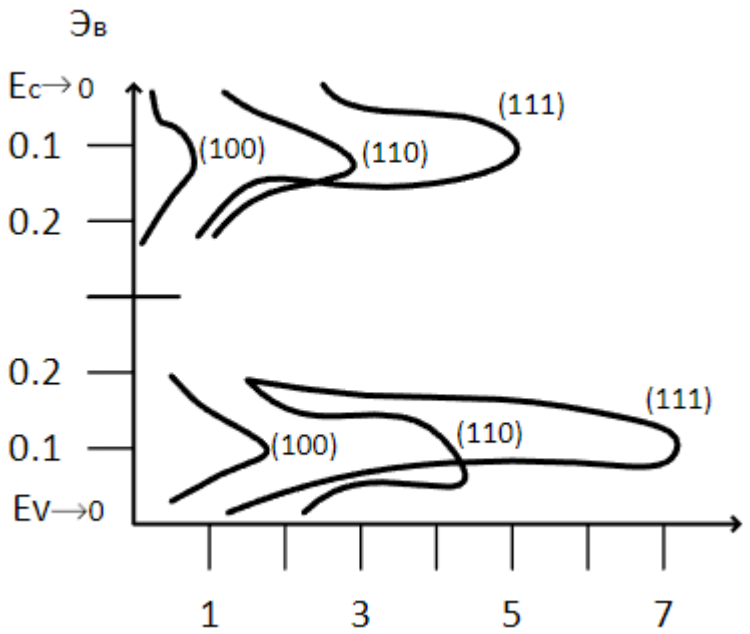


Рисунок 3.8 – Плотность поверхностных состояний на границе раздела Si/SiO_2, измеренная для трёх ориентаций кристалла

Таким образом, с понижением температуры уровень Ферми практически линейно движется к краю зоны основных носителей заряда.

Рассмотрим далее МДП-структуру с полупроводником *n*-типа, в запрещённой зоне которого имеется некоторое произвольное энергетическое

распределение ПС. Пусть МДП-структура находится при температуре T_0 (близкой к комнатной), на неё подано напряжение $V_з = V_{ПЗ}$, рисунок 3.7, а. Заштрихованная площадь $N_t(E)$ соответствует заполненным состояниям, а заряд $Q_t(0)$, существующий при этом, определяет некоторую часть напряжения плоских зон.

Понизим далее температуру до некоторого значения T. Уровень Ферми окажется расположенным ближе к зоне проводимости E_c, рисунок 3.7, б, напряжение плоских зон возрастает на величину, рассчитываему по формуле 3.29.

$$\Delta V_{ПЗ} = \Delta V^{(t)}{}_{ПЗ} + \Delta V_К, \tag{3.29}$$

где: $\Delta V^{(t)}{}_{ПЗ}$ связано с изменением заполнения ПС, $\Delta V_к$ с изменением контактной разности потенциалов (КРП). Величина $\Delta V_к$ зависит только от изменения положения уровня Ферми в полупроводнике и может быть записана в виде равенства 3.30.

$$\Delta V_К = [E_F(T) - E_F(T_0)], \tag{3.30}$$

а изменение $\Delta V^{(t)}{}_{ПЗ}$ может быть определено равенством 3.31

$$\Delta V^{(t)}{}_{ПЗ} = \frac{\Delta Q_t(T_0, T)}{C_d}. \tag{3.31}$$

Подставив 3.30 и 3.31 в 3.29, получится равенство 3.32.

$$\Delta Q_t(T) = C_d * [\Delta V_{ПЗ}(T) - \Delta V_К(T)]. \tag{3.32}$$

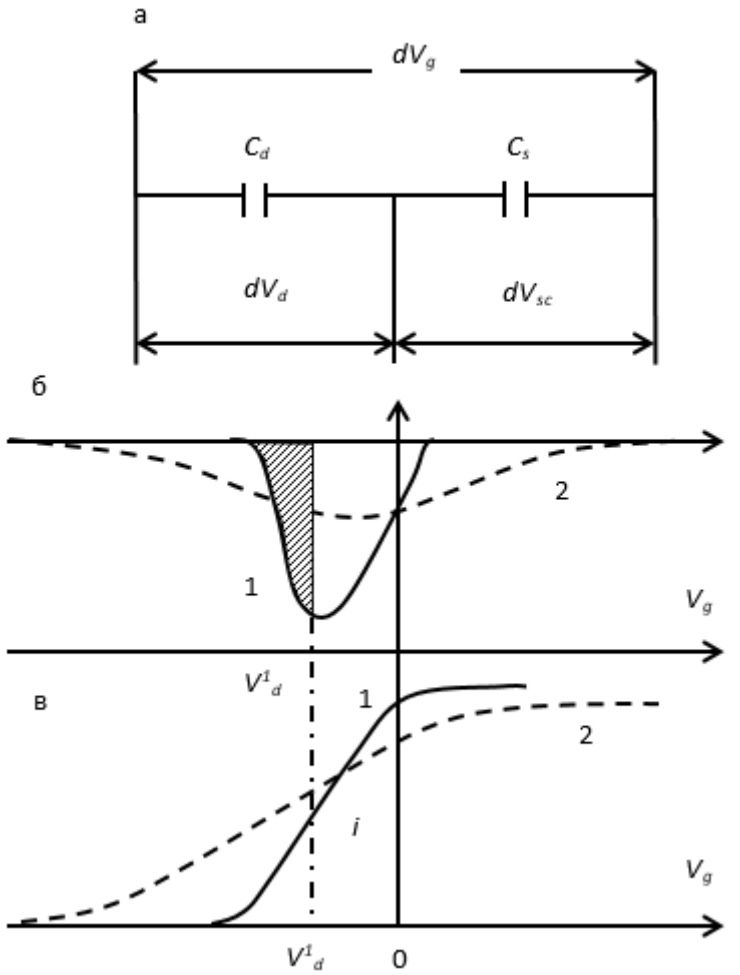
Таким образом, измерив температурную зависимость $V_{ПЗ}(T)$ по отношению к некоторой исходной температуре T_0, мы получим зависимость $\Delta Q_t(T)$. Поскольку каждому значению T соответствует определенное положение уровня Ферми на поверхности полупроводника, мы получаем часть кривой захваченного заряда $\Delta Q_t(E_{Fs})$, графическое дифференцирование которого даёт энергетическое распределение ПС в некотором интервале энергий. Характерный вид распределений, полученных этим методом на кремниевых МДП-структурах, приведён на рисунке 3.8.

Как было сказано, необходимая для анализа любых электрофизических параметров МДП-структур зависимость поверхностного потенциала полупроводника от управляющего напряжения наиболее часто определяется из

высокочастотных ВФХ. Основным условием корректной применимости данного метода является отсутствие перезарядки ПС на частоте измерительного сигнала. По отношению к обменам между ПС и зоной основных носителей заряда с характерными временами τ_{nt} для полупроводника *n*-типа и τ_{pt} для полупроводника *p*-типа это условие выражается неравенствами $\omega\tau_{nt} \geq 1$ и $\omega\tau_{pt} \geq 1$, степень которых зависит от плотности ПС. При наличии квазинепрерывного спектра ПС характерные времена τ_{nt} и τ_{pt} относятся главным образом к ПС, энергетическое положение которых совпадает с уровнем Ферми, и могут быть определены равенствами $\tau_{nt} = (\sigma_{nt} * \nu_n * n_{s0})^{-1}$ и $\tau_{pt} = (\sigma_{pt} * \nu_p * p_{s0})^{-1}$, где σ_{nt} и σ_{pt} – эффективные сечения захвата, ν_n, ν_p – средние тепловые скорости, n_{s0}, p_{s0} – поверхностные концентрации основных носителей заряда.

При не слишком больших произведениях $\sigma_{nt}\nu_n$ или $\sigma_{pt}\nu_p$ исключение перезарядки ПС экспериментально легко достижимо при изгибах зон, соответствующих сильному обеднению ОПЗ. Но поскольку величины τ_{nt} или τ_{pt} экспоненциально убывают с изменением изгиба зон при стремлении к плоским зонам и обогащению ОПЗ, всегда найдётся такое граничное значение $|V_{sc}^{\text{гр}}|$, начиная с которого перезарядка ПС будет происходить при каждой данной частоте измерительного сигнала. Если это значение $|V_{sc}^{\text{гр}}|$ попадает в область модуляции ёмкости МДП-структуры внешним напряжением $V_з$, то измеренные значения ёмкости окажутся завышенными по отношению к истинным.

На рисунке 3.9 представлена МДП-структура на низких частотах.



1 – малая плотность ПС; 2 – большая плотность ПС

а – низкочастотная эквивалентная схема МДП-структуры; б – НЧ ВФЧ; в – интеграл от НЧ ВФХ;

Рисунок 3.9 – МДП-структура на низких частотах

Для обнаружения и исключения такого рода эффектов требуются другие, не зависящие от перезарядки ПС, методы измерения поверхностного потенциала.

Рассмотрим эквивалентную схему МДП-структуры на низких частотах, приведённую на рисунке 3.9, а, где $C_s = C_{sc} + C_{t0}$. Дифференциально малые изменения поверхностного потенциала dV_{sc} и управляемого напряжения $dV_з$ связаны между собой равенством 3.33.

$$dV_{sc} = \frac{C_d - C(V_з)}{C_d} dV_з. \qquad (3.33)$$

Оно вытекает из равенства $C_d * (dV_з - dV_{sc}) = C_{sc} * dV_{sc}$ после подстановки в него ёмкости полупроводника $C_s = C_d * C * (C_d - C)^{-1}$. Интегрируя (3.33), получим формулу 3.34, а.

$$\Delta V_{sc} = V_{sc}^{(2)} - V_{sc}^{(1)} = \int_{V_{з1}}^{V_{з2}} \frac{C_d - C(V_з)}{C_d} dV_з, \qquad (3.34, а)$$

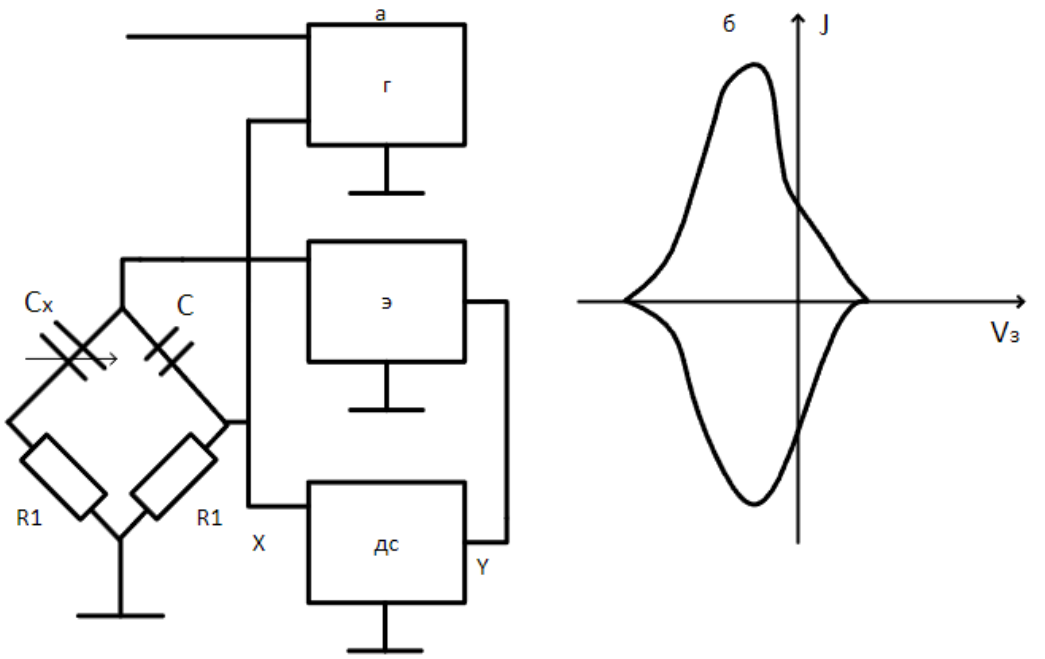
где: $V_{з1}$ и $V_{з2}$ – значения напряжения $V_з$ в области модуляции ёмкости МДП-структуры, а ΔV_{sc} – соответствующее изменение размерного поверхностного потенциала. Если в качестве $V_{з1}$ взять некоторое напряжение $V_{з\infty}$, при котором ёмкость МДП-структуры практически равна ёмкости диэлектрического слоя, то с точностью до некоторой константы V_{s0} равенство 3.34, а дает значение поверхностного потенциала V_{sc} при каждом данном напряжении $V_з$. Получается равенство 3.34, б.

$$V_{sc} = V_{sc} + \int_{-V_{з\infty}}^{V_з} \frac{C_d - C(V_з)}{C_d} dV_з, \qquad (3.34, б)$$

На рисунке 3.9, б заштрихована площадь НЧ ВФХ, соответствующая некоторому значению $V_з^*$, а на рис. 3.9, в (кривая 1) показана полная зависимость $V_{sc}(V_з)$, полученная последовательным интегрированием низкочастотной ВФХ.

При наличии ПС с квазинепрерывным распределением по энергиям НЧ ВФХ деформируется кривая 2 на рисунке 3.9, б, соответствующая зависимости $V_{sc}(V_з)$, получается, естественно, более растянутой (кривая 2 на рисунке 3.9, в.

На рисунке 3.10 представлено измерение квазистатической ВФХ.



а – мостовая схема измерения квазистатической ВФХ; Г – генератор; Э – электрометр; ДС – двухканальное устройство отбражения

б – вид зависимостей $J(V_з)$ при$C_d = C_k$

Рисунок 3.10 – Измерение квазистатической ВФХ

При измерении низкочастотной, или, как говорят в этом случае, квазистатической, ВФХ более удобным оказывается измерение квазистационарного тока J через МДП-структуру при медленном изменении управляющего напряжения. При линейном законе этого изменения, имеем $V_з = C_{at}$ и $J(V_з) = \frac{C_d * V_з}{dt} = \pm C_a$, а равенство (3.34, б) приобретает вид, представленный в равенстве 3.35.

$$V_{sc} = V_{s0} + \int_{-V_{з\infty}}^{V_з} \frac{J_0 - J(V_з)}{J_0} dV_з, \qquad (3.35)$$

где: J_0 – ток через МДП-структуру, когда её ёмкость равна ёмкости диэлектрика. В этом случае J-V-характеристика эквивалентна её C-V-характеристике.

Для измерения зависимости $J(V_з)$ может быть применена мостовая схема типа приведённой на рисунке 3.10, а. При условии $C_k = C_d$ в этом случае исключается петля J-V-характеристики, обусловленная сменой знака развёртки

напряжения, а сама *J-V*-характеристика приобретает вид, показанный на рисунке 3.10, б. Использование интегрирующего блока позволяет непосредственно на экране дисплея получить зависимость $V_{sc}(V_з)$ с точностью до некоторой аддитивной постоянной.

В данной схеме, рисунок 3.11, а на МДП-конденсатор *C* от генератора Г подается изменяющееся во времени напряжение $V_з$; ток, идущий на зарядку этого конденсатора, протекает через конденсатор переменной ёмкости $C_э$, включенной в цепь обратной связи электрометрического усилителя Э.

Напряжение $V_э$ на его выходе пропорционально заряду $Q_{инд}$. Находится по формуле 3.36.

$$V_э = -\frac{Q_{инд}}{C_э * (1 + K^{-1})}, \quad (3.36)$$

где: *K* – коэффициент усиления.

Напряжение $V_н$ на нагрузочном сопротивлении $R_н$ в данной схеме может быть определено соотношением 3.37.

$$V_н = a * (V_з - \frac{b * Q_{инд}}{C_d}), \quad (3.37)$$

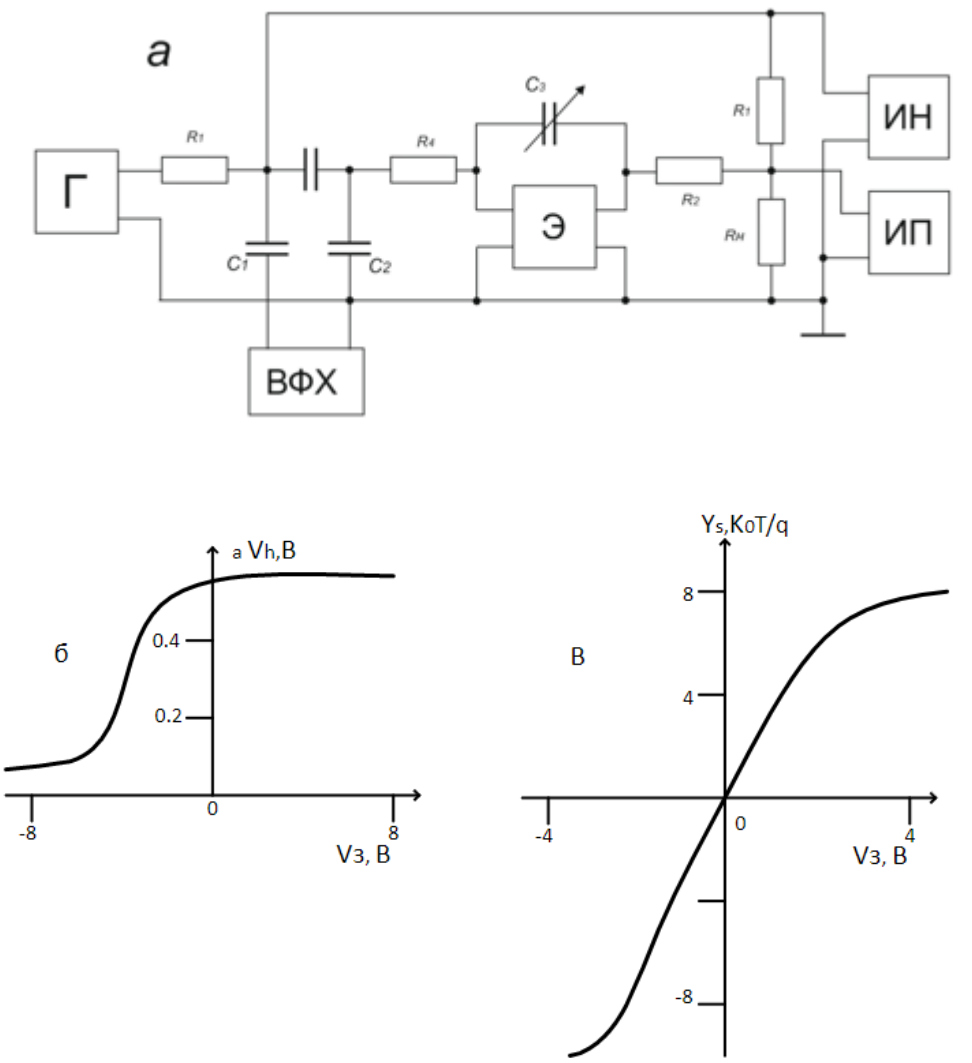
где: *a*, *b* – коэффициенты, находящиеся по формуле 3.38, а, б соответственно.

$$a = \frac{R_1^{-1}}{R_2^{-1} + R_н^{-1}}; \quad (3.38, а)$$

$$b = \frac{R_1}{R_2} * \frac{C_d}{C_э * (1 + K^{-1})}. \quad (3.38, б)$$

Величина ёмкости $C_э$ выбирается из условия *b* = 1, в этом случае напряжение $V_н$ практически пропорционально разности, $V_з - V_{пз} = V_{sc} + \frac{Q_{инд}}{C_d}$ получаем равенство 3.39.

$$V_н = aV_{sc}(V_з) + const. \quad (3.39)$$



а – структурная схема измерения зависимости $V_{sc}(V_з)$; Г – генератор медленно меняющегося напряжения $V_з$; Э – электрометрический усилитель; ИН – индикатор напряжения $V_з$; ИП – индикатор напряжения $V_н = aV_{sc} + const$; ВФХ – измеритель ВЧ ВФХ

б – типичный вид зависимости $y_s(V_з)$; в – зависимость $y_s(V_з)$, полученная по ВЧ ВФХ (точки) и квазистатическим методом

Рисунок 3.11 – Измерение и зависимость поверхностного потенциала от напряжения затвора

В качестве генератора предлагается использовать генератор сигналов специальной формы АКИП-3410/5, так как он имеет нужный диапазон частот, обеспечивает необходимые формы сигналов и погрешность установленной частоты: диапазон частот 1 мкГц…10 МГц; формы сигналов: синус, меандр,

импульс, постоянное смещение, треугольник, синхросигнал, экспонента; $1x10^{-6}$ соответственно. Он представлен на рисунке 3.12.

Рисунок 3.12 – Генератор сигналов специальной формы АКИП-3410/5

В качестве электрометрического усилителя предлагается использовать электрометр В2987В, так как он обеспечивает необходимую точность измерения: минимальное разрешение измерения – 0,01 фА, позволяет выполнять быстрый статистический анализ без использования ПК. Он представлен на рисунке 3.13.

Рисунок 3.13 – Электрометр В2987В

В качестве индикатор напряжения предлагается использовать Вольтметр КС КС96В-К31-500В-3.4 52826, так как он обеспечивает необходимую точность измерения: ±0,5%. Он представлен на рисунке 3.14.

Рисунок 3.14 – Вольтметр КС КС96В-К31-500В-3.4 52826

В качестве измерителя ВЧ ВФХ предлагается использовать портативный осциллограф *Micsig STO*1004, так как он обеспечивает высокую частоту дискретизации: 1 Гига выборка в секунду (ГВыб/с), возможность подключить несколько каналов. Он представлен на рисунке 3.15.

Рисунок 3.15 – Портативный осциллограф *Micsig STO*1004

Практическим признаком выполнения равенства $b = 1$ может служить выход

зависимости $V_n(V_з)$ на горизонтальные участки при достаточно больших напряжениях $V_з$, рисунок 3.11, б. Действительно имеет место предельное соотношение 3.40.

$$\lim_{|V_3|\to\infty}\frac{dV_{sc}}{dV_3}=\lim_{|V_3|\to\infty}\frac{dC_d}{dC_s}=0. \qquad (3.40)$$

Для исключения общей константы, входящей в равенства 3.35 или 3.37, одно из значений $V_{sc}(V_з)$ должно быть определено из других измерений. В частности, это значение можно найти из ВЧ ВФХ в области сильного обеднения, поскольку здесь легко устранить перезарядку ПС на частоте измерительного сигнала. Необходимым признаком выполнения этого условия в данном случае является совпадение наклонов кривых $V_{sc}(V_з)$, определенных двумя методами в некотором диапазоне значений V_{sc}.

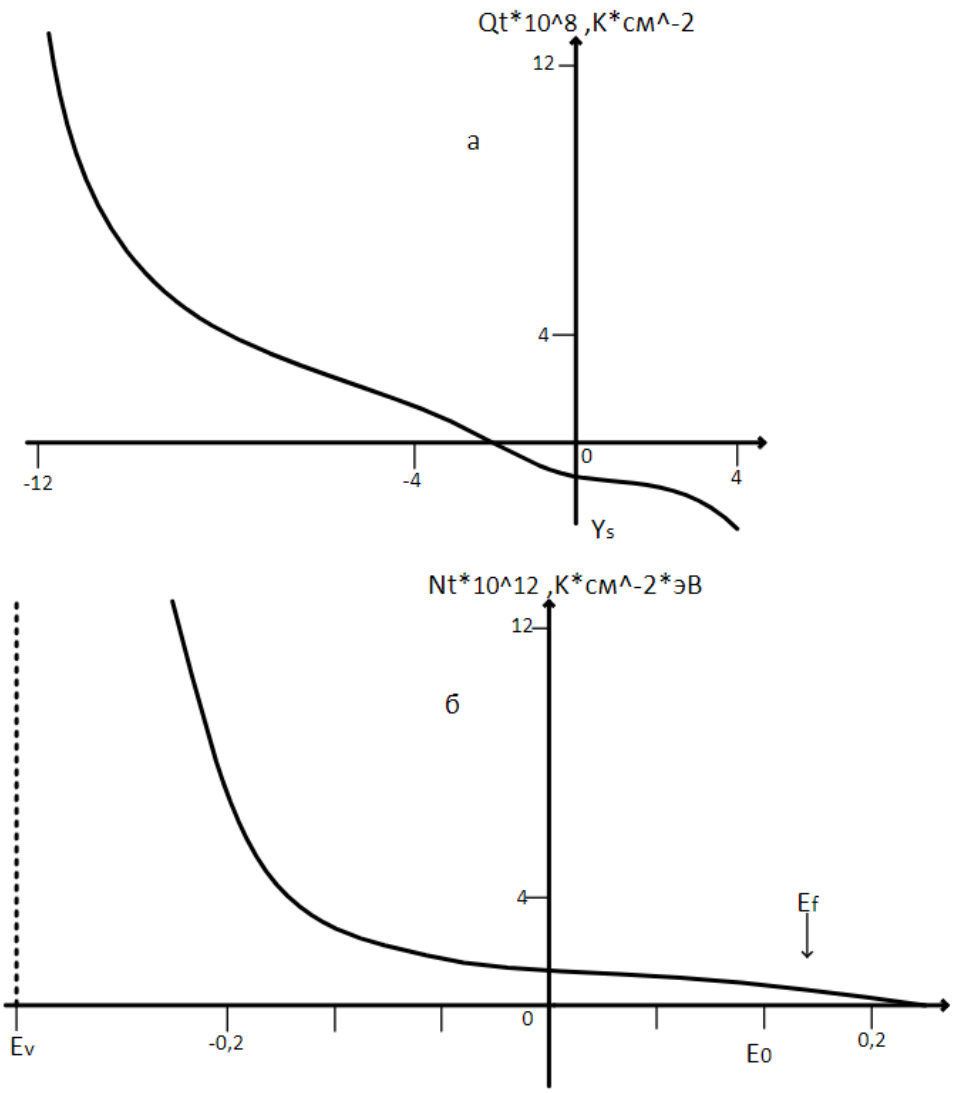
При не слишком большой плотности ПС может быть использовано также то обстоятельство, что средняя точка зависимости $V_{sc}(V_з)$, рисунок 3.9, в с достаточной точностью (примерно $\pm k_0T/q$) соответствует изгибу зон, равному $\ln\lambda$.

В качестве примера на рисунке 3.11, в для структуры A1-Si_3N_4-SiO_2-Ge(n), приведены зависимости $V_{sc}/V_з$, измеренные по ВЧ ВФХ и квазистатическим методом. Видно, что наклоны кривых действительно совпадают в области обеднения, а в области обогащения из ВЧ ВФХ получаются завышенные значения V_{sc} (при каждом данном значении $V_з$). Этот эффект – естественное следствие вклада ПС в ВЧ-ёмкость полупроводника.

К недостаткам метода следует отнести высокую его чувствительность к сквозным токам утечки через диэлектрик (при их наличии обработка экспериментальных кривых существенно усложняется или вообще становится невозможной), а к достоинствам – более протяженный диапазон надежно определяемых значений V_{sc}, рисунок 3.11, в.

Поэтому с помощью квазистатического метода с большей точностью и в большем интервале изменения V_{sc} может быть построена кривая захваченного заряда $\Delta Q_t^0(y_s)$. Эта кривая и распределение ПС по энергиям $N_t(E_t)$, полученные

графическим дифференцированием зависимости $\Delta Q_t^0(y_s)$, для той же МДП-структуры приведены на рисунке 3.16.



а – зависимость захваченного заряда $Q_t(y_s)$; б – распределение ПС по энергиям

Рисунок 3.16 – Измеренные данные, полученные квазистатическим методом для структуры Al-Si_3N_4-SiO_2-Ge (n) при 295 К.

На рисунке 3.16, б сплошная кривая соответствует экспоненциальному распределению ПС $N_t = A\exp(aE_t)$ с параметрами A = 1,5·10^{12} $см^{-2}·эВ^{-1}$ и a = 10,5 $эВ^{-1}$.

4 Техника безопасности и охрана труда работника лаборатории

4.1 Расчет освещённости лаборатории по исследованию ВФХ МДП-структур

Лаборатория имеет размеры: a = 25 м; b = 10 м; H = 4 м. Высота рабочих столов $h_{рс}$ = 0,8м. Необходимо рассчитать равномерное освещение на уровне рабочей плоскости при использовании светильников типа ЛСП 01.

Нормы освещенности в зданиях управления, конструкторских и проектных организаций, научно-исследовательских учреждений указаны в СНиП II-4-79. По ним определено, что норма освещенности в лаборатории E равна 300 лк и коэффициент запаса $К_з$ = 1,5.

Исходя из рекомендуемых значений $h_{св}$≤2м, принимаем расстояние от светильника до потолка $h_{св}$=0,3м. Высота подвеса светильника h определяется по формуле 4.1.

$$h = H - (h_{св} + h_{рс}). \quad (4.1)$$

Следовательно, высота подвеса светильника равна:

$$h = 4 - (0,3 + 0,8) = 2,9 \text{ м}.$$

Характеристики светильника типа ЛСП 01 указаны в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Характеристики светильника типа ЛСП 01

Число лам, шт × мощность ламп, Вт	Длина светильника, мм	Вид установки	Условия эксплуатации	$\lambda_{нв} = \frac{L}{h}$
2×80 2×150	1536	подвесной	Для нормальных условий среды	1,6-1,8

$\lambda_{нв}$ – коэффициент, который показывает расстояние между соседними рядами светильников в зависимости от высоты подвеса, выбирается 1,7.

Следовательно, расстояние между соседними рядами светильников равно:

$$L_{нв} = \lambda_{нв} * h = 1,7 * 2,9 = 4,93 \text{ м}.$$

Количество рядов светильников $n_р$ находится по формуле 4.2.

$$n_р = \frac{b}{L_{нв}}. \quad (4.2)$$

Следовательно, количество рядов светильников равно:

$$n_р = \frac{10}{4,93} = 2,03.$$

Округляется до целого, и следует, что количество рядов светильников равно 2.

Для светильника типа ЛСП 01 коэффициенты отражения потолка $P_п$, стен $P_{ст}$ и расчетной поверхности $P_{рп}$:

$$P_п = 70\%; P_{ст} = 50\%; P_{рп} = 10\%.$$

Индекс помещения i рассчитывается по формуле 4.3.

$$i = \frac{a * b}{h * (a + b)}. \quad (4.3)$$

Следовательно, индекс помещения равен:

$$i = \frac{a * b}{h * (a + b)} = \frac{25 * 10}{2,9 * (25 + 10)} = 2,46.$$

Округлив, получается, что индекс помещения равен 2,5.

По рисунку 4.1 определяется коэффициент использования светового потока для светильника типа ЛСП 01.

Коэфф. отражения	Тип светильника		
	ЛСП 01	ЛОУ 1П	ЛСП 02
Рп, % Рст, % Ррп, %	70 70 50 50 0 50 50 50 30 0 30 10 10 10 0	70 70 50 30 0 50 50 30 10 0 30 10 10 10 0	70 70 50 30 0 50 50 30 10 0 30 10 10 10 0
Индекс помещения i	Коэффициент использования η, %		
0,5	28 26 25 22 19	28 26 19 17 14	28 27 21 18 16
0,6	32 32 32 26 23	31 29 23 20 18	33 32 25 22 20
0,7	36 34 33 30 26	36 34 28 24 22	38 36 30 26 24
0,8	39 36 36 32 29	39 37 30 26 24	42 39 33 29 28
0,9	42 39 38 35 31	43 40 34 29 27	46 42 37 32 31
1,0	44 41 40 37 33	46 42 36 32 30	49 45 40 35 34
1,1	46 42 42 39 35	48 44 38 34 31	52 48 42 38 36
1,25	48 44 43 41 37	51 47 41 36 34	55 50 45 40 39
1,5	51 47 46 44 40	55 50 45 40 37	60 54 49 45 44
1,75	54 49 48 46 42	58 53 48 42 40	63 57 52 48 47
2,0	55 50 49 47 44	60 55 49 44 41	65 59 55 51 49
2,5	58 53 52 50 46	65 58 52 48 45	70 63 59 55 54
3,0	60 54 53 51 48	67 60 54 50 46	73 65 61 58 56
4,0	62 56 54 53 50	70 62 57 53 49	77 68 64 61 59

Рисунок 4.1 – Коэффициент использования светового потока

Следовательно, коэффициент использования светового потока η равен 0,53.

Световой поток от светильников одного ряда $\Phi_р$ находится по формуле 4.4.

$$\Phi_р = \frac{E * К_з * a * b}{n_в * \eta}. \quad (4.4)$$

Следовательно, световой поток от светильников одного ряда равен:

$$\Phi_р = \frac{300 * 1,5 * 25 * 10}{2 * 0,53} = 106132 \text{ лм}.$$

Так как в светильнике типа ЛСП 01 применяются лампы мощностью 80 Вт и 150 Вт, то можно выбрать лампы типа ЛДЦ 80-4 или ЛХБ 150 со световыми потоками $\Phi_{л1}$ = 2865 лм и $\Phi_{л2}$ = 8000 лм соответственно, что указано в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Технические данные люминесцентных ламп

Тип лампы	Мощность, Вт	Световой поток лм, после 100 ч горения	Длина лампы, мм
ЛДЦ 80-4	80	3380	1514,2
ЛХБ 150	150	8000	1524,2

Если использовать в светильнике две лампы ЛДЦ 80-4, то в ряду необходимо установить:

$$n_{л1} = \frac{\Phi_р}{2 * \Phi_{л1}} = \frac{106132}{2 * 3380} = 15,7 = 16 \text{ светильников.}$$

А если использовать светильнике две лампы ЛХБ 150, то в ряду необходимо установить:

$$n_{л2} = \frac{\Phi_р}{2 * \Phi_{л2}} = \frac{106132}{2 * 8000} = 6,6 = 7 \text{ светильников.}$$

При использовании ламп типа ЛДЦ 80-4 длина одного ряда светильников $L_{р1} = L_{св} * n_{л1} = 1,536 * 16 = 24,58$ м а с лампами ЛХБ 150: $L_{р2} = L_{св} * n_{л2} = 1,536 * 7 = 10,75$ м.

Целесообразней выбрать лампы ЛДЦ 80-4, при использовании которых светильники заполняют ряд почти без разрывов. При использовании ламп большей мощности ряд имел бы разрывы.

Расчетная освещенность $E_р$ и относительная погрешность расчета $\delta_{отн}$ определяются по формулам 4.4 и 4.5 соответственно.

$$E_р = \frac{E * \Phi_{л1} * n_{л1} * 2}{\Phi_р}. \quad (4.4)$$

$$\delta_{отн} = \frac{E_р - E}{E} * 100\%. \quad (4.5)$$

Следовательно, Расчетная освещенность и относительная погрешность расчета равны:

$$E_р = \frac{300 * 3380 * 16 * 2}{106132} = 305,73 \text{ лм;}$$

$$\delta_{отн} = \frac{305,73 - 300}{300} * 100\% = 1,91\%.$$

Расчет закончен, так как отклонение расчетной освещенности от нормируемой не превышает допустимые пределы от +20% до -10%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы были достигнуты следующие результаты:

1. Разработана модифицированная методика получения тонких наноструктурированных покрытий для устройств гибкой электроники.

2. Обеспечена возможность получения кристаллических пленок при температурах, не превышающих 180 °С с дополнительным УФ воздействием в процессе синтеза.

3. Исследованы образцы методами растровой электронной микроскопии, рентгеновского фазового анализа, оптической спектроскопии в видимом и ультрафиолетовом диапазоне, ультрафиолетовой фотоэлектронной спектроскопии.

4.Обеспечена возможность осаждения пленок на гибкие подложки.

В работе исследована эволюция структурных электрофизических параметров наноструктурированных пленок оксида цинка, полученных золь-гель методом при термической обработке и комбинированной обработке, включающей термическое и УФ воздействия. Установлено, что использование термической обработки пленок приводит к формированию крупных агрегатов (20-30 мкм), имеющих тенденцию к укрупнению с увеличением продолжительности обработки, при этом структура материала на низком уровне иерархии, определяемая рентгеновским фазовым анализом, а также оптическая ширина запрещенной зоны практически не зависит от времени обработки. Вероятно, это связано с формированием наночастиц материала, ответственных за эти свойства на этапах созревания золя, предшествующих его нанесению на подложки. Введение в систему дополнительного УФ облучения приводит к разрушению агрегатов, сформированных на ранних этапах, и формированию рентгеноаморфных частиц ZnO при обработки в течение 90 минут. Увеличение времени обработки приводит к «сшиванию» частиц, увеличению размеров монокристаллов и одновременному росту концентрации точечных дефектов,

приводящих к уменьшению оптической ширины запрещенной зоны. Таким образом, комбинированная УФ и термическая обработки пленок позволяет, с одной стороны, формировать материал с нанокристаллической структурой, а с другой стороны – управлять его дефектностью.

Также установлено, что применение низкотемпературного отжига при его комбинации с дополнительным воздействием ультрафиолетового облучения трёхкратно сокращает время для достижения тех же электрофизических и физико-химических параметров плёнок ZnO, что и при 270 мин. термообработки. Эти результаты имеют перспективу применения при изготовлении термоэлектрических батарей, газовых сенсоров, катализаторов и фотокатализаторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы были достигнуты следующие результаты:

1. Произведен анализ литературы про современные тонкопленочные транзисторы: область применения, материалы затвора и подзатворного диэлектрика.

2. Разработан метод, позволяющий рассчитать основные параметры и характеристики тонкопленочных транзисторов

3. Разработан методика измерения параметров, которые невозможно точно вычислить на стадии разработки, а именно: встроенного заряда диэлектрика и заряда поверхностного слоя полупроводника.

В работе исследованы основные характеристики тонкопленочного транзистора: выяснено, что пороговое напряжение равно 1,12 В, при этом максимальное напряжение, которое можно подавать, равно 2,2 В. При этом протекает небольшой ток, следовательно, у транзистора будет небольшая потребляемая энергия. Также выяснено, что можно пренебречь учетом изменением реальной длины канала в зависимости от температуры, так как изменение длины канала в диапазоне температур от 198 К до 398 К не превышает 3%. Также был разработан алгоритм измерения заряда поверхностных состояний, что позволяет учитывать в расчетах характеристик транзистора влияние этого заряда на пороговое напряжение и напряжения плоских зон. Это позволяет более точно определить пороговое напряжение транзистора, параметры и характеристики тонкопленочного транзистора.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Kanatzidis, M.G. Quick-set Thin Films. Nature* 2004, 428, 269–270.

2. *Lu, N.D.; Wei, W.; Chuai, X.C.; Li, L.; Liu, M. Carrier thermoelectric transport model for black phosphorus field-effect transistors. Chem. Phys. Lett.* 2017, 678, 271–274.

3. *Wang, L.; Wang, W.; Xu, G.; Ji, Z.; Lu, N.; Li, L.; Liu, M. Analytical Carrier Density and Quantum Capacitance for Graphene. Appl. Phys. Lett.* 2016, 108, 013503.

4. *Saremi, M. Carrier Mobility Extraction Method in ChGs in the UV Light Exposure. Micro Nano Lett.* 2016, 11, 762–764.

5. *Saremi, M.; Rajabi, S.; Barnaby, H.J.; Kozicki, M.N. The Effects of Process Variation on the Parametric Model of the Static Impedance Behavior of Programmable Metallization Cell (PMC). MRS Proc.* 2014, 1692, 9–39.

6. *Saremi, M. A Physical-based Simulation for the Dynamic Behavior of Photodoping Mechanism in the Chalcogenide Materials Used in the Lateral Programmable Metallization Cells. Solid State Ion.* 2016, 290, 1–5.

7. *Horowitz, G. Organic Thin Film Transistors: From Theory to Real Devices. J. Mater. Res.* 2004, 19, 1946–1962.

8. *Liu, W.Y.; Wu, Q.S.; Ren, Y.K.; Cui, P.; Yao, B.B.; Li, Y.B.; Hui, M.; Jiang, T.Y.; Bai, L. On the bipolar DC flow field-effect-transistor for multifunctional sample handing in microfluidics: A theoretical analysis under the Debye-Huckel limit. Micromachines* 2018, 9, 82.

9. *RSporea, A.; Trainor, M.J.; Young, N.D.; Shannon, J.M.; Silva, S.R.P. Source-gated transistors for order-of-magnitude performance improvements in thin-film digital circuits. Sci. Rep.* 2014, 4, 4295.

10. *Itoh, T.; Kobayashi, A.; Ueno, K.; Ohta, J.; Fujioka, H. Fabrication of InGaN thin-film transistors using pulsed sputtering deposition. Sci. Rep.* 2016, 6, 29500.

11. *Weimer, P.K. The TFT-A New Thin-Film Transistor. Proc. IRE* 1962, 50, 1462–1469.

12. *Fortunato, E.; Barquinha, P.; Pimented, A.; Goncalves, A.; Marques, A.; Pereira, L.; Martins, R. Recent Advances in ZnO Transparent Thin Film Transistors. Thin Solid Films* 2005, 487, 205–211.

13. *LeComber, P.G.; Spear, W.E.; Gaith, A. Amorphous-Silicon Field-Effect Device and Possible Application. Electron. Lett.* 1979, 15, 179–181.

14. *Depp, S.W.; Juliana, A.; Huth, B.G. Polysilicon FET Devices for Large Area Input/Output Application. In Proceedings of the* 1980 *International Electron Devices Meeting, Washington, DC, USA,* 8–10 *December* 1980*; p.* 703.

15. *Tsumura, A.; Koezuka, H.; Ando, T. Macromolecular Electronic Device: Field-Effect Transistor with a Polythiophene Thin Film. Appl. Phys. Lett.* 1986, 49, 1210.

16. *Xu, W.; Hu, Z.H.; Liu, H.M.; Lan, L.F.; Peng, J.B.; Wangn, J.; Cao, Y. Flexible all-organic, all-solution processed thin film transistor array with ultrashort channel. Sci. Rep.* 2016, 6, 29055.

17. *Nomura, K.; Ohta, H.; Takagi, A.; Kamiya, T.; Hirano, M.; Hosono, H. Room-Temperature Fabrication of Transparent Flexible Thin-Film Transistors Using Amorphous Oxide Semiconductors. Nature* 2004, 432, 488–492.

18. *Han, K.; Qiao, G.H.; Deng, Z.L.; Zhang, Y.N. Asymmetric drain extension dual-kk trigate underlap FinFET based on RF/Analog circuit. Micromachines* 2017, 8, 330.

19. *Li, J.F.; Mao, S.M.; Xu, Y.H.; Zhao, X.D.; Wang, W.B.; Guo, F.J.; Zhang, Q.F.; Wu, Y.Q.; Zhang, B.; Chen, T.S. An Improved Large Signal Model for* 0.1 *μm AlGaN/GaN High Electron Mobility Transistors (HEMTs) Process and Its Applications in Practical Monolithic Microwave Integrated Circuit (MMIC) Design in W band. Micromachines* 2018, 9, 396.

20. *Buccella, P.; Stefanucci, C.; Zou, H.; Moursy, Y.; Iskander, R.; Sallese, J.M.; Kayal, M. Methodology for* 3*-D Substrate Network Extraction for SPICE Simulation of Parasitic Currents in Smart Power ICs. IEEE Trans. Comput.-Aided Des. Integr. Circuits Syst.* 2016, 35, 1489–1502.

21. *Lu, N.D.; Wang, L.F.; Li, L.; Liu, M. A Review for Compact Model of Graphene Field-Effect Transistors. Chin. Phys. B* 2017, 26, 036804.

22. *Krishnamoorthy, S.; Chowdhury, M.H. Investigation and a practical compact network model of thermal stress in integrated circuits. Integr. Comput.-Aided Eng.* 2009, 16, 131–140.

23. *Электронный ресурс [Режим доступа]: https://www.src.org/program/grc/ds/research-needs/*2003*/compact-odeling.pdf*

24. *Marinov, O.; Deen, M.J.; Zschieschang, U.; Klauk, H. Organic Thin-Film Transistors: Part I-Compact DC Modeling. IEEE Trans. Electron Dev.* 2009, 56, 2952–2961.

25. *Kacprzak, T.; Materka, A. Compact DC Model of GaAs FETs for Llarge-Signal Computer Calculation. IEEE J. Solid-State Circuits* 1983, 18, 211–213.

26. *Ahmed, S.; Kim, D.; Shichijo, H. A Comprehensive Analytic Model Accumulation-Mode MOSFETs in Polysilicon Thin Films. IEEE Trans. Electron Devices* 1986, 33, 973–985.

27. *Siddiqui, M.J.; Qureshi, S. Surface-Potential-Based Charge Sheet Model for The Polysilicon Thin Film Transistors without Considering Kink Effect. Microelectron. J.* 2001, 32, 235–240.

28. *Iñiguez, B.; Xu, A.; Fjeldly, T.A.; Shur, M.S. Unifed Model for Short-Channel Poly-Si TFTs. Solid-State Electron.* 1999, 43, 1821–1831.

29. *Jacunski, M.D.; Shur, M.S.; Owusu, A.A. A Short-Channel DC SPICE Model for Polysilicon Thin-Film Transistors Including Temperature Effects. IEEE Trans. Electron Devices* 1999, 46, 1146–1159.

30. *Wu, W.J.; Yao, R.H.; Li, S.H.; Hu, Y.F.; Deng, W.L.; Zheng, X.R. A Compact Model for Polysilicon TFTs Leakage Current Including the Poole-Frenkel Effect. IEEE Trans. Electron Devices* 2007, 54, 2975–2984.

31. *Lee, M.; Tai, C.W.; Huang, J.J. Correlation between Gap State Density and Bias Stress Reliability of Nanocrystalline TFTs Comparing with Hydrogenated Amorphous Silicon TFTs. Solid-State Electron.* 2013, 80, 72–75.

32. *Deng, W.L.; Huang, J.K. A Physics-Based Approximation for the Polysilicon Thin-Film Transistor Surface Potential. IEEE Electron. Dev. Lett.* 2011, 32, 647–649.

33. *Li, L.; Debucquoy, M.; Genoe, J.; Heremans, P. A Compact Model for Polycrystalline Pentacene Thin-Film Transistor. J. Appl. Phys.* 2010, 107, 024519.

34. *Hao, Z.W.S.; Duval, J.; Ravelosona, D.; Klein, J.O.; Kim, J.V.; Chappert, C. A Compact Model of Domain Wall Propagation for Logic and Memory Design. J. Appl. Phys.* 2011, 109, 07*D*501.

35. *Valletta, A.; Demirkol, A.S.; Maira, G.; Frasca, M.; Vinciguerra, V.; Occhipinti, L.G.; Fortuna, L.; Mariucci, L. A Compact SPICE Model for Organic TFTs and Applications to Logic Circuit Design. IEEE Trans. Nanotech.* 2016, 15, 754–761.

36. *Hsieh, H.H.; Kamiya, T.; Nomura, K.; Hosono, H.; Wu, C.C. Modeling of Amorphous InGaZnO*4 *Thin Film Transistors and Their Subgap, Density of States. Appl. Phys. Lett.* 2008, 92, 133503.

37. *Ghittorelli*1, *M.; Torricelli*1, *F.; Steen, J.J.V.D.; Garripoli, C.; Tripathi, A.; Gelinck, G.H.; Cantatore, E.; Kovács-Vajna, Z.M. Physical-Based Analytical Model of Flexible a-IGZO TFTs Accounting for Both Charge Injection and Transport. In Proceedings of the* 2015 *IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), Washington, DC, USA,* 7–9 *December* 2015*; Volume* 28, *pp.* 723–726.

38. *Duavll, S.G. Statical Circuit Modeling and Optimization. In Proceedings of the IEEE* 2000 5*th International Workshop on Statistical Metrology, Honolulu, HI, USA,* 10 *June* 2000

39. *Lu N. et al. A review for compact model of thin-film transistors (TFTs) //Micromachines. –* 2018. *– T.* 9. *– №.* 11. *– C.* 599.

40. *T. P. Brody, J. A. Asars, G. D. Dixon, IEEE Trans. Electron Devices* 1973, 20, 995.

41. *A. J. Snell, K. D. Mackenzie, W. E. Spear, P. G. LeComber, A. J. Hughes, Appl. Phys.* 1981, 24, 357.

42. *S.Z. Bisri, T. Takenobu, Y. Yomogida, H. Shimotani, T. Yamao, S. Hotta, Y. Iwasa, Adv. Func. Mater.* 19, 1728 *(*2009*)*

43. *T. Maeda, K. Kato, A. Haruo, Appl. Phys. Lett.* 89, 123508 *(*2006*)*

44. *J. Bettinger, Z. Bao, Adv. Mater.* 22, 651 (2010)

45. *J. Puuigdollers, C. Voz, A. Orpella, R. Quidant, I. Martin, R. Alcubilla, Org. Electron.* 5, 67 (2004)

46. *J. Puuigdollers, C. Voz, M. FoNR*odona, I. Martin, A. Orpella, M. Vetter, R. Alcubilla, Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* 871, 323 (2005)

47. *I. Kymissis, C.D. Dimitrakopoulos, S. Purushothaman, IEEE Trans. Electron Devices* 48, 1060 (2001)

48. *S. Scheinert, G. Paasch, M. Schrodner, H.K. Roth, S. Sensfub, T. Doll, J. Appl. Phys.* 92, 330 (2002)

49. *S.J. Park, J.H. Sung, J.H. Park, H.J. Choi, J.S. Choi, Curr. Appl. Phys.* 6, 636 (2006)

50. *J. Puigdollers, C. Voz, I. Martin, A. Orpella, M. Vetter, R. Alcubilla, J. Non-Cryst, Solids* 338–340, 617 (2004)

51. *Kumar, B., Kaushik, B.K. & Negi, Y.S. Perspectives and challenges for organic thin film transistors: materials, devices, processes and applications. J Mater Sci: Mater Electron* 25, 1–30 (2014).

52. *Kayani Z. N. et al. Fabrication and properties of zinc oxide thin film prepared by sol-gel dip coating method //Materials Science-Poland.* – 2015. – *T.* 33. – *№.* 3. – *C.* 515-520.

53. *Jalil Z. et al. Structural and optical properties of zinc oxide (ZnO) based thin films deposited by sol-gel spin coating method //Journal of Physics: Conference Series.* – *IOP Publishing*, 2018. – *T.* 1116. – *№.* 3. – *C.* 032020.

54. *Mamat M. H. et al. Influence of doping concentrations on the aluminum doped zinc oxide thin films properties for ultraviolet photoconductive sensor applications //Optical Materials.* – 2010. – *T.* 32. – *№.* 6. – *C.* 696-699.

55. *Furuta M. et al. Electrical properties of the thin-film transistor with an indium–gallium–zinc oxide channel and an aluminium oxide gate dielectric stack formed by solution-based atmospheric pressure deposition //IEEE electron device letters.* – 2012. – *T.* 33. – *№.* 6. – *C.* 851-853.

56. *Hussain B. et al. Electron affinity and bandgap optimization of zinc oxide for improved performance of ZnO/Si heterojunction solar cell using PC1D simulations //Electronics.* – 2019. – *T.* 8. – *№.* 2. – *C.* 238.

57. *Subramanian V., Wolf E. E., Kamat P. V. Green emission to probe photoinduced charging events in ZnO− Au nanoparticles. Charge distribution and Fermi-level equilibration //The Journal of Physical Chemistry B.* – 2003. – *T.* 107. – *№.* 30. – *C.* 7479-7485.

58. *Martins R. et al. Role of order and disorder on the electronic performances of oxide semiconductor thin film transistors //Journal of applied physics.* – 2007. – *T.* 101. – *№.* 4. – *C.* 044505.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

Задание на выпускную квалификационную работу

«Утверждаю»
Зав. кафедрой НиМЭ
Пронин И.А.
(фамилия, инициалы)
«08» июня 2023 г.

З А Д А Н И Е
на бакалаврскую работу

1. Студент(ка) гр. 19ПД1 факультета информационных технологий и электроники

Направление подготовки 11.03.04. «Электроника и наноэлектроника»
Профиль Микроэлектроника и твердотельная электроника
Козин Алексей Сергеевич
(фамилия, имя, отчество)

2. Руководитель Головяшкин Алексей Николаевич
(фамилия, имя, отчество)

3. Тема бакалаврской работы Определение и моделирование параметров МДП-транзистора с подзатворным диэлектриком на основе оксида цинка
Тема утверждена приказом ПГУ № 359 а/о от «05» апреля 2023 г.

4. Техническое задание на бакалаврскую работу (вид работы: разработка, проектирование, исследование, и т.д.; назначение; основные параметры; условия функционирования и т.д.)

1. Произвести анализ литературы про современные тонкопленочные транзисторы: область применения, материалы затвора и подзатворного диэлектрика.

2. Разработать метод, позволяющий рассчитать основные параметры и характеристики тонкопленочных транзисторов

3. Разработать алгоритм измерения параметров, которые невозможно точно вычислить на стадии разработки, а именно: встроенного заряда диэлектрика и заряда поверхностного слоя полупроводника.

5. Объем и содержание основной части бакалаврской работы

5.1. Пояснительная записка (перечень вопросов, подлежащих разработке, обоснований, описаний, расчетов и т.д.)

1 Анализ современных тонкопленочных транзисторов

1.1 История тонкопленочных транзисторов

1.2 Область применения тонкопленочных транзисторов

1.3 Анализ исследуемого транзистора

1.4 Свойства материала оксида цинка

2 Разработка метода расчета основных параметров и характеристик тонкопленочного транзистора

2.1 Расчет параметров и характеристик МДП-транзистора с индуцированным каналом

2.2 Расчет характеристик МДП-транзистора

2.3 Расчет эффективной длины канала

3 Разработка методики измерения встроенного заряда диэлектрика и заряда поверхностных состояний полупроводника

3.1 Обзор МОП- структуры

3.2 Теория вольт-фарадных характеристик МОП- транзистора

3.3 Методика измерения заряда поверхностных состояний полупроводника

4 Техника безопасности и охрана труда работника лаборатории

4.1 Расчет освещённости лаборатории по исследованию ВФХ МДП-структур

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

1. Определение и моделирование параметров МДП- транзистора с подзатворным диэлектрикомна основе оксида цинка (1 слайд)

2. Цели и задачи ВКР (1 слайд)

3. Анализ тонкопленочного транзистора (1 слайд)

4. Алгоритм расчета тонкопленочного транзистора (1 слайд)

5. Основные формулы, использующиеся для расчетов (2 слайда)

6. Рассчитанные параметри и характеристики тонкопленочного транзистора (2 слайда)

7. Методика измерения заряда поверхностных состояний полупроводника (1 слайд)

8. Расчет освещенности лаборатории по исследованию ВФХ МДП-структур (1 слайд)

9. Спасибо за внимание (1 слайд)

6. Консультанты и содержание дополнительных разделов

6.1. _____

_____

Консультант _____

7. К

Наименование этапов работы	Объем работы	Срок выполнения	Подпись руководителя, консультанта
Анализ современных тонкопленочных транзисторов	20%	10.06.2023	
Разработка метода расчета основных параметров и характеристик тонкопленочного транзистора	30%	11.06.2023	
Разработка методики измерения встроенного заряда диэлектрика и заряда поверхностных состояний полупроводника	30%	12.06.2023	
Техника безопасности и охрана труда работника лаборатории	10%	13.06.2023	
Графическая часть	5%	14.06.2023	
Оформление пояснительной записки	5%	14.06.2023	

Руководитель бакалаврской работы _____ Головяшкин А.Н
подпись фамилия, инициалы

Дата выдачи задания «8» июня 2023 г.

Задание к исполнению принял _____ Козин А.С.
подпись фамилия, инициалы

«8» июня 2023 г.

Бакалаврскую работу к защите допустить

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

«19» июня 2023 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

Расчет параметров и характеристик МДП транзистора с индуцированным *n*-каналом в среде программирования *MathCad*

тип подложки:p

Материалы и толщина диэлектрика затвора (нм): Al2O3 (45)

Материал электрода затвора: ZnO

$n_p := 50 \times 10^{20}$ концентрация примесей в подложке, м^(-3)

$n_i := 1.45 \cdot 10^{16}$ концентрация собственных носителей,м ^(-3)

$q := 1.6 \cdot 10^{-19}$ заряд электрона,Кл

$l_k := 15 \cdot 10^{-6}$ Длина канала

$b_k := 10 \cdot 10^{-6}$ Ширина канала

$gl := 2 \cdot 10^{-6}$ Глубина залегания областей истока и стока, м

$n_{sii} := 100 \cdot 10^{24}$ Концентрация примесей областей истока и стока, м^(-3)

$\chi := 4.1$ Энергия сродства,В

$T := 300$ Температура образца, К

$\Delta Eg := 1.1$ Ширина запрещенной зоны, эВ

$k := 1.38 \cdot 10^{-23}$ Постоянная больцмана, Дж/К

$\chi_{ZnO} := 4.$ Энергия сродства к электрону ZnO, эВ

$\varepsilon_{0.} := 8.85 \cdot 10^{-12}$ Диэлектрическая постоянная, Ф/м

$\varepsilon_{sii} := 12$ Диэлектрическая проницаемость Si

$\varepsilon_d := 8.$ Диэлектрическая проницаемость Al2O3

$\delta_d := 45 \cdot 10^{-9}$ Толщина диэлектрика Al2O3

$E_{prob} := 10^8$ Напряженность электрического при пробое Al2O3, В /м

$\mu_p := 450$ Подвижность дырок в Si, см^2/(В *с)

$T_{min} := 188$ Минимальная температура образца, К

$T_{max} := 398$ Максимальная температура образца, К

$Ef_{ZnO} := 0.6$ Энергия Ферми ZnO

$\Delta Eg_{ZnO} := 3.2$ Ширина запрещенной зоны ZnO

$n_{ZnO} := 1.9$ коэффициент преломления ZnO

$n_{Si} := 3.4$ коэффициент преломления Si

$n_{dielectrik} := \sqrt{n_{ZnO} \cdot n_{Si}} = 2.549$ коэффициент преломления диэлектрика

$n_{Al2O3} := 2.402$ коэффициент преломления Al2O3

1.Расчет порогового напряжения:

$\lambda := \frac{n_p}{n_i} = 3.448\times 10^{5}$ Параметр легирования

$\eta_{sc} := -\ln(\lambda) = -12.751$ Безразмерный потенциал уровня Ферми

$A_{sc} := \chi + \frac{1}{2}\cdot \Delta Eg - \eta_{sc}\cdot \frac{k\cdot T}{q} = 5.04$ Работа выхода из п/п,В

$À_{ZnO} := \chi_{ZnO} + \frac{1}{2}\cdot \Delta Eg_{ZnO} - Ef_{ZnO} = 5.5$ Работа выхода из ZnO,В

$\varphi_k := A_{sc} - À_{ZnO} = -0.46$ Контактная разность потенциалов,В

$L_d := \sqrt{\frac{\varepsilon_{sii}\cdot \varepsilon_{0.}\cdot k\cdot T}{2\cdot n_i\cdot q^2}} = 2.434\times 10^{-5}$ Длина Дебая,м

$y_s := 2\ln(\lambda) = 25.502$ Потенциал при котором формируется инверсный слой

$F := \lambda^{\frac{1}{2}}\cdot e^{\frac{-y_s}{2}} = 1.703\times 10^{-3}$ Функция,задающая распредление напряженности поля вблизи поверхности

$Q_{sc} := 2\cdot q\cdot n_i\cdot L_d\cdot F = 1.9229165036475202\ 10^{-10}$ Заряд ионизированной примеси в области подложки, Кл/м^2

$C_0 := \frac{\varepsilon_{0.}\cdot \varepsilon_d}{\delta_d} = 1.672\times 10^{-3}$ Удельная емкость д/э, Ф/м^2

$Uzi_{por} := -\varphi_k - \frac{Q_{sc}}{C_0} + \frac{k\cdot T}{q}\cdot y_s = 1.12$ Пороговое напряжение, В

3.Максимальное напряжение З-И:

$Upr := E_{prob} \cdot \delta_d = 4.5$ Напряжение пробоя д/э Al23O3, В

$Uzi_{max} := \frac{Upr}{2} = 2.25$ $Umax_{zi} := 2.2$ Максимальное допустимое значение напряжение з-и, В

4.Максимальное допустимое напряжение сток-исток:

$U_{sm} := \frac{q \cdot n_p \cdot l_k^2}{2 \cdot \varepsilon_{sii} \cdot \varepsilon_{0.}} = 847.458$ Напряжение смыкания,В

$\rho := \frac{1}{q \cdot \mu_p \cdot n_p \cdot 10^{-6}} = 2.778$ Удельное сопротивление,Ом*см

$U_{prob} := 48 \cdot \rho^{0.78} = 106.494$ Пробой сток-подложка,В

$Usm_{max} := \frac{U_{prob}}{1.4} = 76.067$ $Umax_{si} := 75$ Максимальное допустимое напряжение сток-исток,В

5.Расчет выходных статических характеристик:

$E_f := k \cdot \frac{T}{q} \cdot y_s = 0.66$ Уровень Ферми,В

$\mu_n := 750 \cdot 10^{-4}$ Подвижность электронов в канале,м^2/В*с

$$Usi_{nas}(U_{zi}) := \frac{|U_{zi}| - Uzi_{por}}{1 + \frac{|Q_{sc}|}{4 \cdot C_0 \cdot |E_f|}}$$

$E_{kr} := 0.8 \cdot 10^6$ Напряженность,В/м

$T_0 := 298$ Температура,К

$Uzi1 := 1.2$ $Usi1 := 2$

$Uzi2 := 1.3$ $Usi2 := 3$ В

$Uzi3 := 1.4$ $Usi3 := 4$

$$Ic_{sub}(Temp, U_{zi}, U_{si}) := \frac{\mu_n \cdot \left(\frac{T_0}{Temp}\right)^2}{\left(1 + \frac{\left|Usi_{nas}(U_{zi})\right|}{E_{kr} \cdot l_k}\right)} \cdot \frac{b_k}{l_k} \cdot \left[\left[C_0 \cdot \left(\left|U_{zi}\right| - Uzi_{por} \right) + \left|Q_{sc}\right| \right] \cdot \left|U_{si}\right| - C_0 \cdot \frac{U_{si}^{\,2}}{2} - \frac{4}{3} \cdot \left|Q_{sc}\right| \cdot \left|E_f\right| \cdot \left[\left(1 + \frac{\left|U_{si}\right|}{2 \cdot \left|E_f\right|} \right)^{\frac{3}{2}} - 1 \right] \right]$$

$$Inas(Temp, U_{zi}) := Ic_{sub}(Temp, U_{zi}, Usi_{nas}(U_{zi}))$$

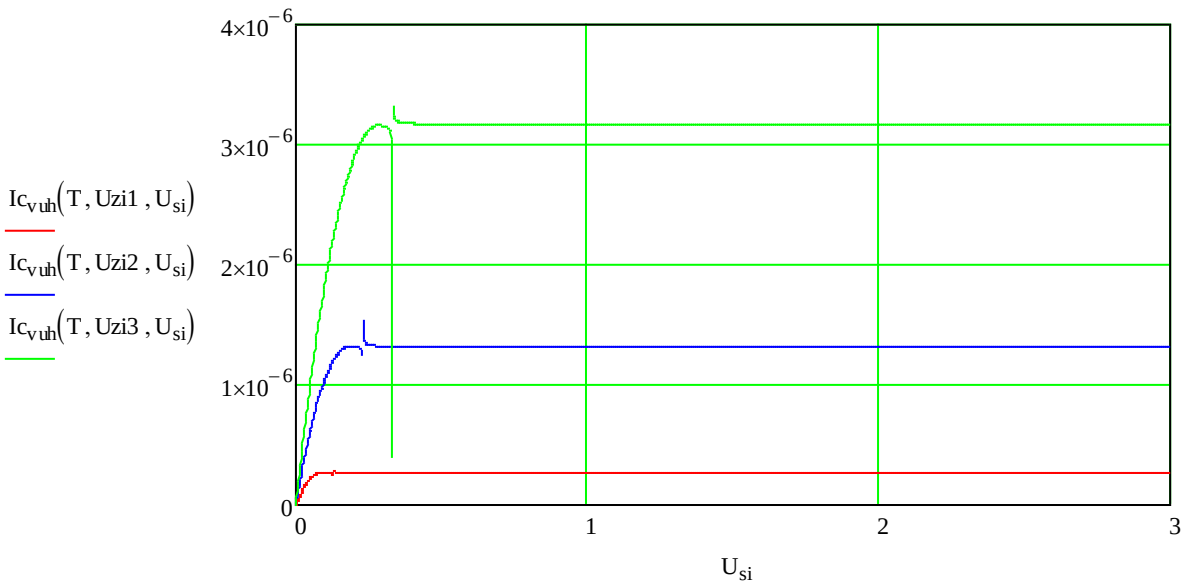
$$U_{pl.s} := -\varphi_k - \frac{Q_{sc}}{C_0} = 0.46$$ Напряжение плоских зон,В

$\beta := 0.6$ Подгоночные коэффициенты

$$l_{ots}(U_{zi}, U_{si}) := \frac{1}{\frac{1}{\sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon_{sii}}{q \cdot n_p} \cdot \left(U_{si} - Usi_{nas}(U_{zi})\right)}} + \frac{\varepsilon_{sii}}{\varepsilon_d \cdot \delta_d} \cdot \frac{1}{\left(U_{si} - Usi_{nas}(U_{zi})\right)} \cdot \left[\alpha \cdot \left(U_{si} - U_{zi} - U_{pl.s}\right) + \beta \cdot \left(U_{si} - Usi_{nas}(U_{zi}) + U_{pl.s}\right)\right]}$$

$$Ic_{pol}(Temp, U_{zi}, U_{si}) := \frac{Inas(Temp, U_{zi})}{1 - \frac{l_{ots}(U_{zi}, U_{si})}{l_k}}$$

$$Ic_{vuh}(Temp, U_{zi}, U_{si}) := \begin{cases} Ic_{sub}(Temp, U_{zi}, U_{si}) & \text{if } U_{si} \le Usi_{nas}(U_{zi}) \\ Ic_{pol}(Temp, U_{zi}, U_{si}) & \text{if } U_{si} > Usi_{nas}(U_{zi}) \end{cases}$$

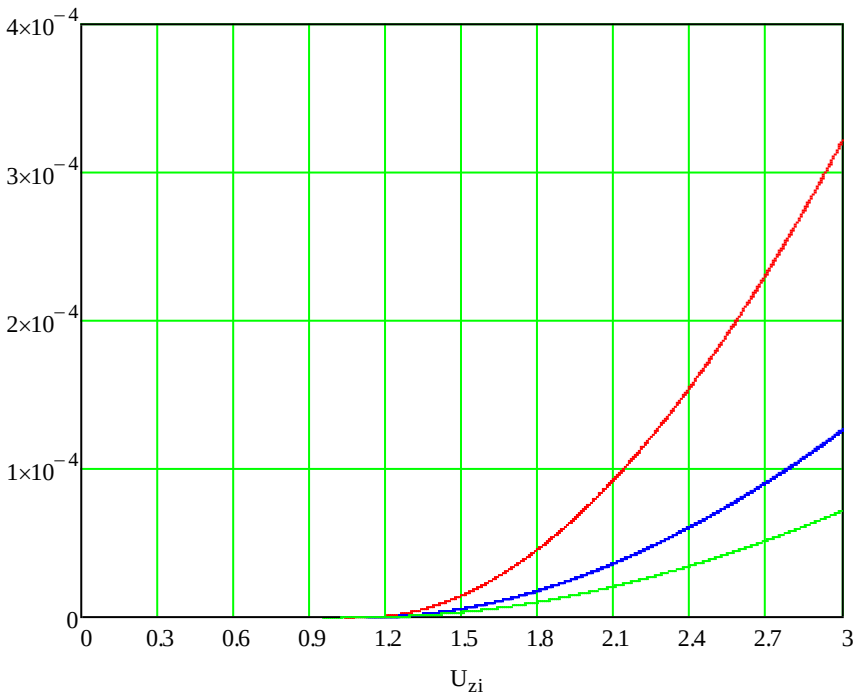


Передаточные характеристики:

$Ic_{pol}(T_{min}, U_{zi}, Usi1)$

$Ic_{pol}(T, U_{zi}, Usi1)$

$Ic_{pol}(T_{max}, U_{zi}, Usi1)$

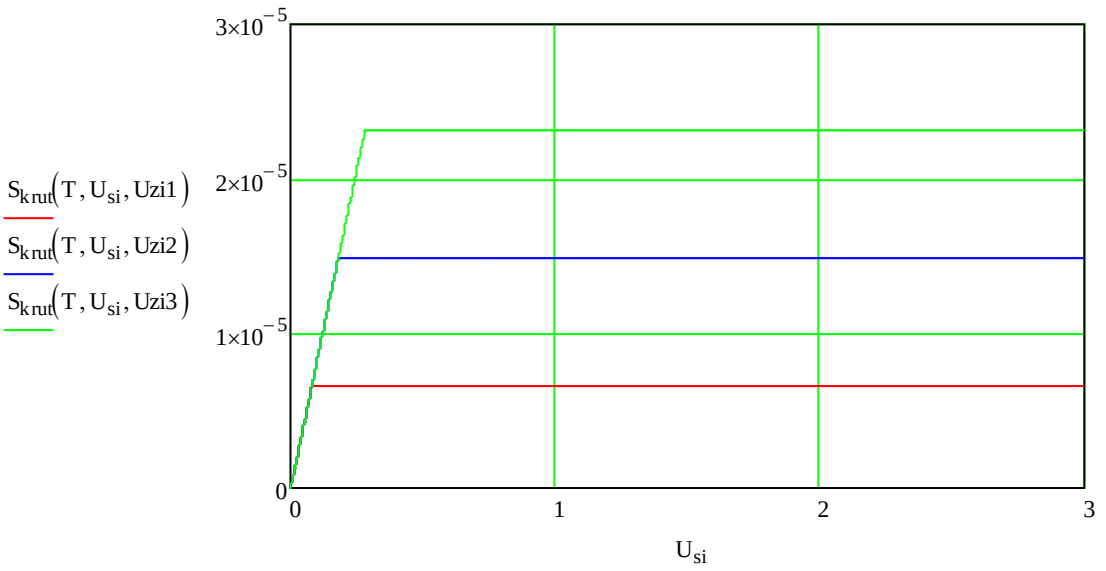


6.Расчет крутизны передаточной характеристики:

$$S1(Temp, U_{si}) := \frac{b_k \cdot \left[\mu_n \cdot \left(\frac{T_0}{Temp}\right)^2\right] \cdot C_0 \cdot U_{si}}{l_k}$$

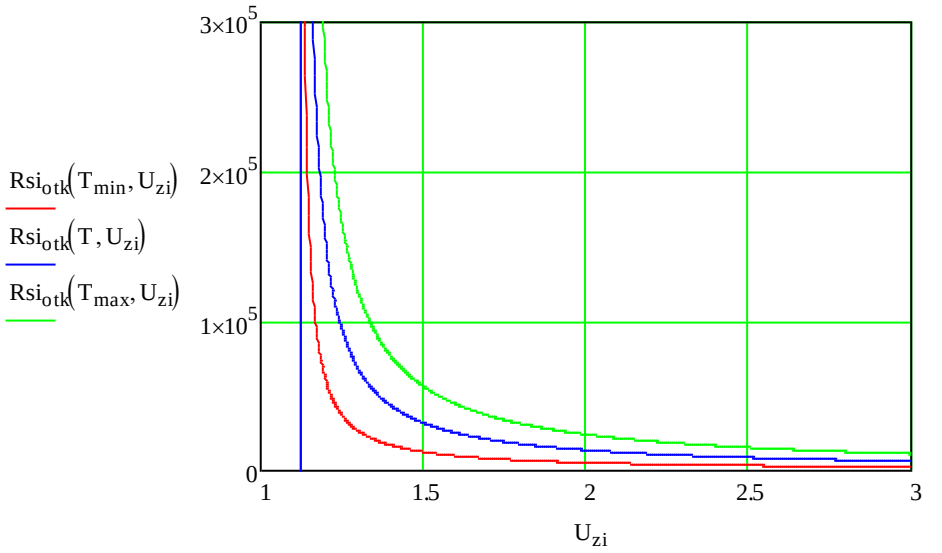
$$S2(Temp, U_{zi}) := \frac{b_k \cdot \left[\mu_n \cdot \left(\frac{T_0}{Temp}\right)^2\right] \cdot C_0 \cdot Usi_{nas}(U_{zi})}{l_k}$$

$$S_{krut}(Temp, U_{si}, U_{zi}) := \begin{cases} S1(Temp, U_{si}) & \text{if } U_{si} \le Usi_{nas}(U_{zi}) \\ S2(Temp, U_{zi}) & \text{if } U_{si} \ge Usi_{nas}(U_{zi}) \end{cases}$$



7.Расчет сопротивления сток-исток в окрытом состоянии

$$Rsi_{otk}(Temp, U_{zi}) := \frac{l_k}{b_k \cdot \left[\mu_n \cdot \left(\frac{T_0}{Temp}\right)^2\right] \cdot C_0 \cdot (U_{zi} - Uzi_{por})}$$

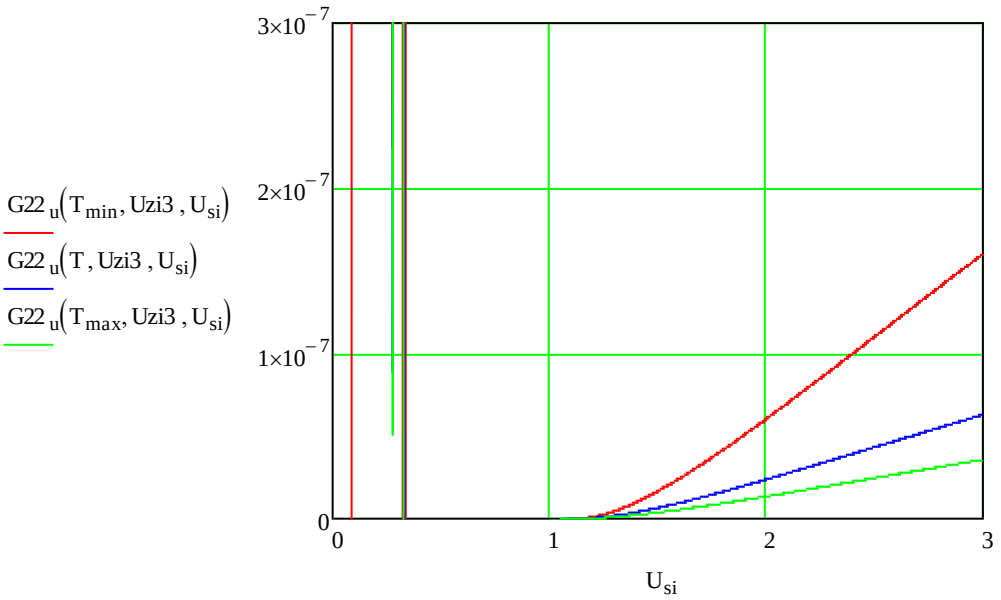


8.Расчет активной составляющей выходной проводимости :

$$g22_u(Temp, U_{zi}, U_{si}) := \frac{b_k}{l_k} \cdot \left[\mu_n \cdot \left(\frac{T_0}{Temp}\right)^2\right] \cdot \left[C_0 \cdot \left(U_{zi} - Uzi_{por}\right) + Q_{sc} - C_0 \cdot U_{si} - Q_{sc} \cdot \left(1 + \frac{U_{si}}{2 \cdot E_f}\right)^{\frac{1}{2}}\right]$$

$$g22_{u2}(Temp, U_{zi}, U_{si}) := \frac{Inas(Temp, U_{si})}{l_k \cdot \left(1 - \frac{l_{ots}(U_{zi}, U_{si})}{l_k}\right)^2} \cdot \frac{l_{ots}(U_{zi}, U_{si})}{2 \cdot \left(U_{si} - Usi_{nas}(U_{zi})\right)}$$

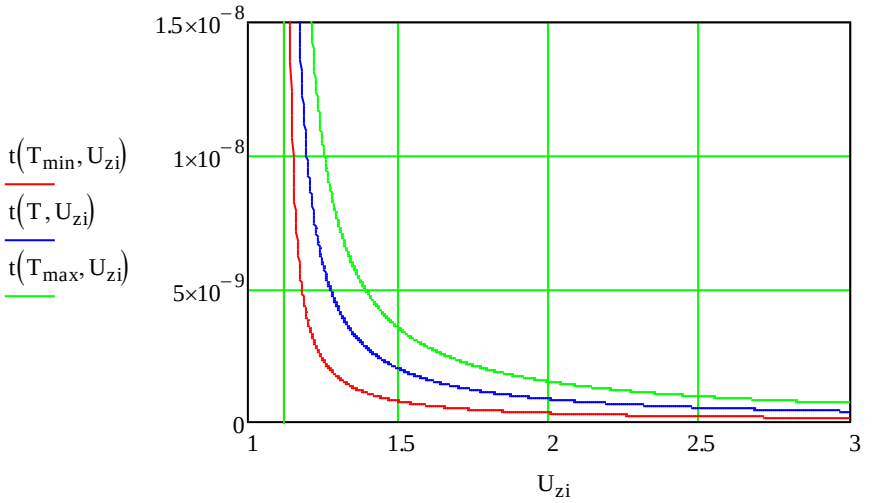
$$G22_u(Temp, U_{zi}, U_{si}) := \begin{cases} g22_u(Temp, U_{zi}, U_{si}) & \text{if } U_{si} \le Usi_{nas}(U_{zi}) \\ g22_{u2}(Temp, U_{zi}, U_{si}) & \text{if } U_{si} \ge Usi_{nas}(U_{zi}) \end{cases}$$



9.Частотные свойства:

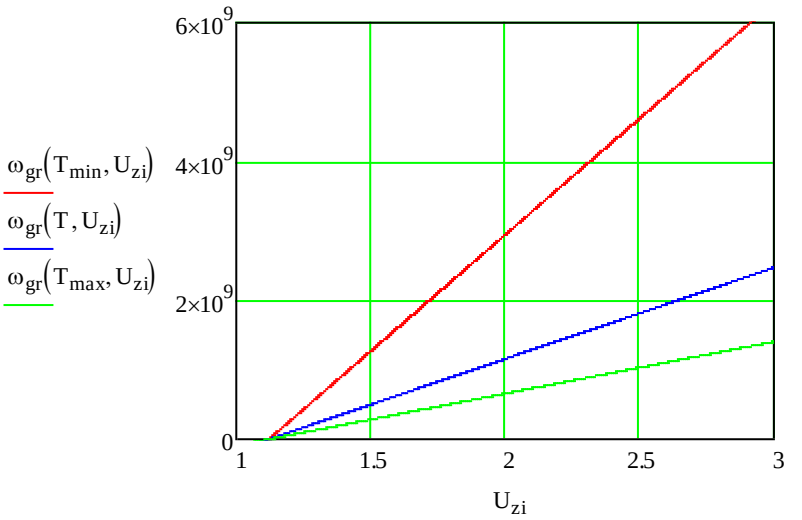
$$\tilde{N}_{vh} := b_k \cdot l_k \cdot \frac{C_0}{2} = 1.254 \times 10^{-13}$$

$$t(Temp, U_{zi}) := \frac{Rsi_{otk}(Temp, U_{zi})}{2} \cdot \tilde{N}_{vh}$$



$$\omega_{gr}(Temp, U_{zi}) := 4\mu_n \cdot \left(\frac{T_0}{Temp}\right)^2 \cdot \frac{(U_{zi} - Uzi_{por})}{l_k^2}$$

граничная частота:



10.Начальный ток стока:

$S := l_k \cdot b_k = 1.5 \times 10^{-10}$ м^2

$\tau := 2.5 \cdot 10^{-3} = 2.5 \times 10^{-3}$ с

$Umax_{si} = 75$ В

$Igext := \frac{1}{L_d \cdot n_i} \cdot \left[\sqrt{\frac{n_p \cdot \varepsilon_{0.} \cdot \varepsilon_{sii} \cdot (\varphi_k + Umax_{si})}{2 \cdot q}} \right] = 3.152 \times 10^{4}$ отношение тока генерации к экстракции

$I_G(U) := S \cdot \frac{-n_i}{\tau} \cdot \sqrt{\frac{q \cdot \varepsilon_{0.} \cdot \varepsilon_{sii} \cdot (\varphi_k - U)}{2 \cdot n_p}}$

$I_G(-Umax_{si}) = -3.0962497441558057 \times 10^{-16}$ ток генерации, А

Фактическая длина канал

$A_{sc1}(T) := \chi + \frac{1}{2} \cdot \Delta Eg - \eta_{sc} \cdot \frac{k \cdot T}{q}$ Работа выхода из п/п в зависимости от температуры, В

$\varphi k(T) := A_{sc1}(T) - A_{ZnC}$ Контактная разность потенциалов в зависимости от температуры, В

$\delta pn(T) := \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon_{sii} \cdot \varepsilon_{0.} \cdot |\varphi k(T)|}{q \cdot n_p}}$ Толщина p-nперехода в зависимости от температуры, м

$l_{ef}(T) := l_k - 2 \cdot \delta pn(T)$ Эффективная длина канала в зависимости от температуры, м

$\Delta l(T) := 100 - \frac{l_k - \delta pn(T)}{l_k} \cdot 100$ Разница между геометрической длиной канала и эффективной, %

$$T1 := T_{min}..T_{max}$$

График зависимости контактной разности потенциалов

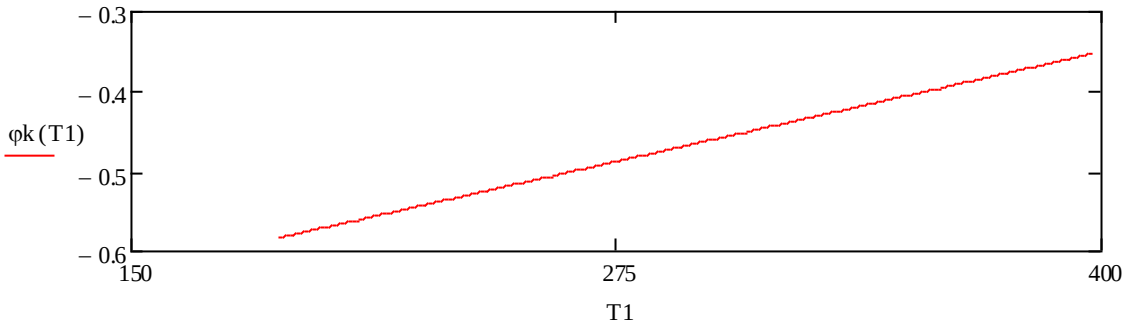


График зависимости толщины перехода от температуры

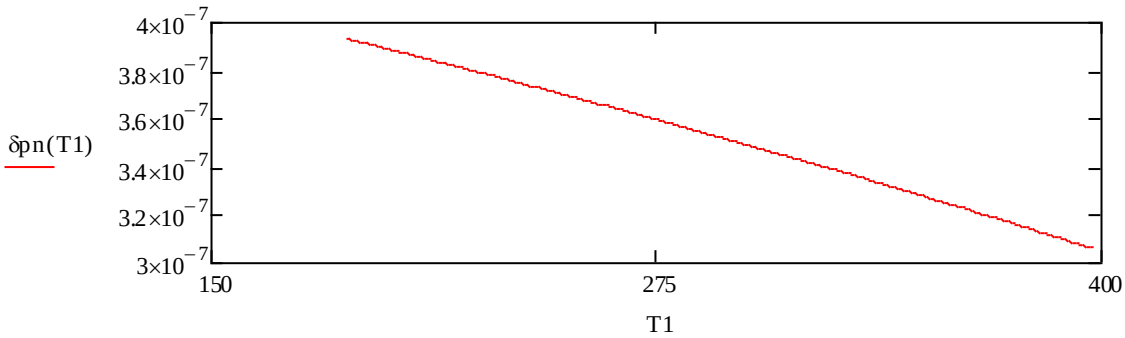


График зависимости эффективной длины канала в зависимости от температуры

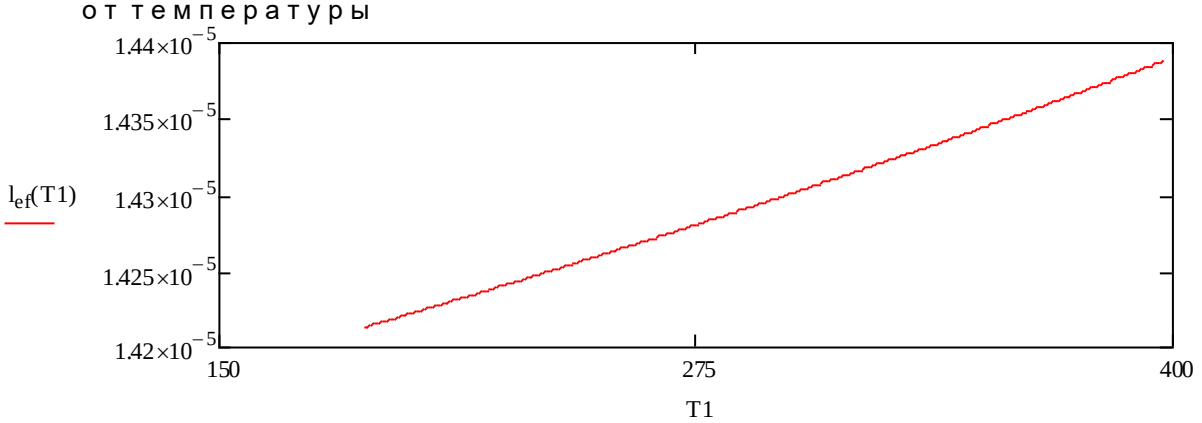
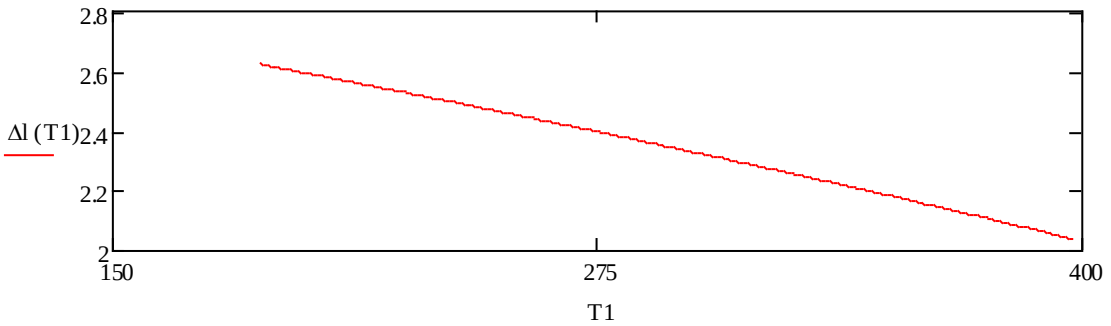


График зависимости разницы между геометрической длиной канала и эффективной



$\delta pn(T) = 3.495 \times 10^{-7}$ Толщина перехода при температуре 300К, м

$l_{ef}(T) = 1.43 \times 10^{-5}$ Эффективная длина канала при температуре 300 К, м

Разница между геометрической длиной канала и эффективной при температуре 300 К, %

ПРИЛОЖЕНИЕ В

(обязательное)

Презентация ВКР

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Пензенский государственный университет»

Факультет информационных технологий и электроники

Кафедра: «нано- и микроэлектроника»

Определение и моделирование параметров МДП- транзистора с подзатворным диэлектриком на основе оксида цинка

Выполнил: Козин Алексей Сергеевич

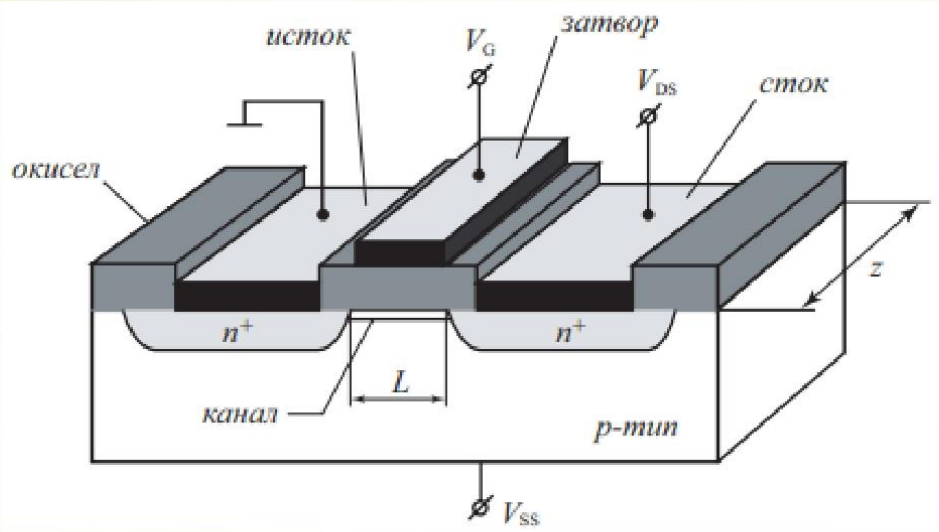
Научный руководитель: доцент кафедры нано- и микроэлектроники Пензенского государственного университета Головяшкин Алексей Николаевич

Цель: исследовать основные параметры и характеристики тонкопленочного транзистора с прозрачным электродом на основе оксида цинка.

Задачи:

- 1. Произвести анализ литературы про современные тонкопленочные транзисторы: область применения, материалы затвора и подзатворного диэлектрика.
- 2. Разработать метод, позволяющий рассчитать основные параметры и характеристики тонкопленочных транзисторов
- 3. Разработать методику измерения параметров, которые невозможно определить на стадии разработки, а именно - значение встроенного заряда диэлектрика и заряда поверхностного слоя полупроводника.

Структура тонкопленочного транзистора



$$n_{диэл} \approx \sqrt{n_{Si} * n_{ZnO}} \approx \sqrt{3,42 * 1,9} \approx 2,549$$

Условие выбора материала подзатворного диэлектрика

Алгоритм расчет тонкопленочного транзистора

1) расчет порогового напряжения МДП-транзистора;

2) расчет максимальных напряжений на затворе и стоке;

3) расчет выходных характеристик МДП-транзистора;

4) расчет крутизны передаточных характеристик МДП-транзистора;

5) расчет сопротивления сток-исток в открытом состоянии;

6) расчет активной составляющей выходной проводимости;

7) расчет частотных свойств;

8) расчет реальной длины канала.

Основные формулы, использующиеся при расчетах

$$U_{\text{зипор}} = -\frac{Q_{sc}}{C_d} + \varphi_t * y_s - \varphi_k$$ Пороговое напряжение

$$I_c = \frac{\mu_0 (\frac{T_0}{T})^2}{(1 + \frac{U_{синас}}{E_{кр} l})} \frac{b}{l} (((C_0 (U_{зи} - U_{пор}) + |Q_{sc}|) U_{си} - C_0 \frac{U_{си}^{\ 2}}{2} - \frac{4}{3} |Q_{sc}| E_f ((1 + \frac{U_{си}}{2|E_f|})^{\frac{3}{2}} - 1))$$ Ток стока на сублинейном участке

$$Ic = \frac{Ic_{нас}}{1 - \frac{l_{отс}}{l_к}}$$ Ток стока на пологом участке

$$S_{\text{перед}} = \frac{b_к}{l_к} \mu_0 (\frac{T_0}{T})^2 C_d U_{си}$$ Крутизна передаточных характеристик на сублинейном участке

$$S_{\text{перед}} = \frac{b_к}{l_к} \mu_0 (\frac{T_0}{T})^2 C_d U_{синас}$$ Крутизна передаточных характеристик на крутом участке

$$Rси_{отк} = \frac{l_к}{b_к * \mu_0 (\frac{T_0}{T})^2 C_d (U_{зи} - U_{зипор})}$$ Сопротивление сток-исток в открытом состоянии

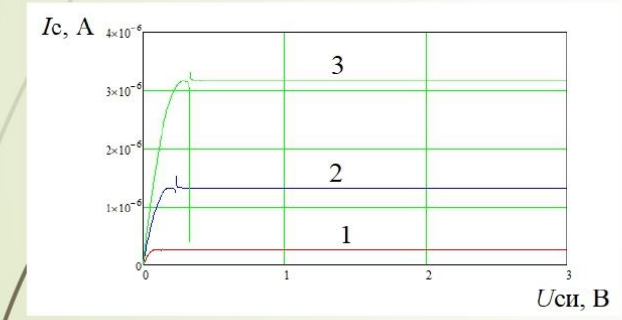
$$l_{эф} = l_к - 2 * \delta_{p-n}$$ Эффективная длина канала

Рассчитанные параметры и характеристики тонкопленочного транзистора

$U_{\text{зипор}} = 1.12$ В. Пороговое напряжение

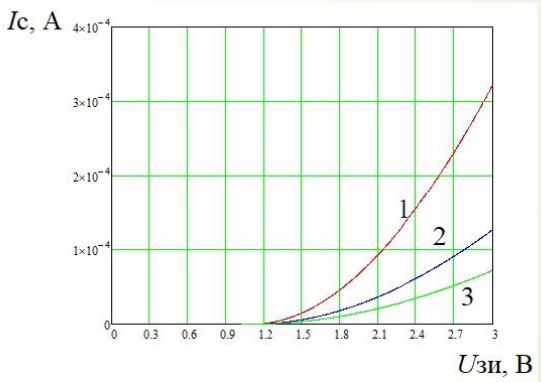
$U_{\text{си}_{\text{max}}} = 75$ В. Максимальное напряжение сток-исток

$U_{\text{зи}_{\text{max}}} = 2.2$ В. Максимальное напряжение затвор-исток



1 – при $U_{\text{зи}} = 1.2$ В; 2 – при $U_{\text{зи}} = 1.3$ В; 3 – при $U_{\text{зи}} = 1.4$ В

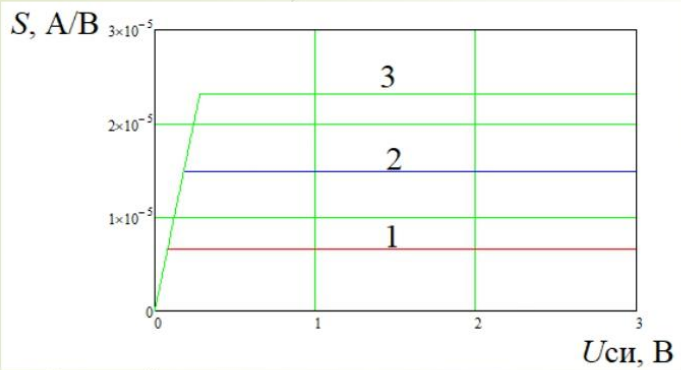
Семейство выходных характеристик при разных напряжениях затвор-исток при температуре 300 К



1 – при температуре 198 К; 2 – при температуре 300 К; 3 – при температуре 398 К.

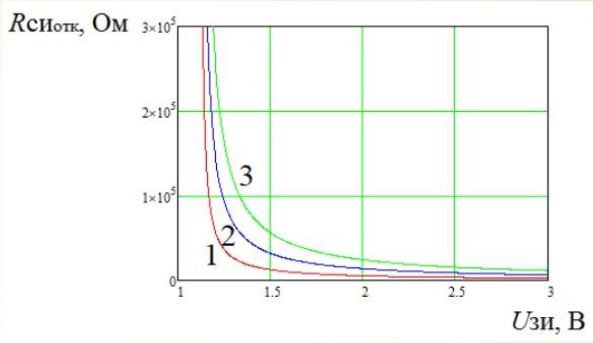
Семейство передаточных характеристик при напряжении сток-исток 2 В

Рассчитанные параметры и характеристики тонкопленочного транзистора (продолжение)



1 – при $U_{зи}$ = 1.2 В; 2 – при $U_{зи}$ = 1.3 В; 3 – при $U_{зи}$ = 1.4 В

Семейство крутизны передаточной характеристики при температуре 300 К



1 – при температуре 198 К; 2 – при температуре 300 К; 3 – при температуре 398 К.

Семейство сопротивления сток-исток в открытом состоянии при разных температурах

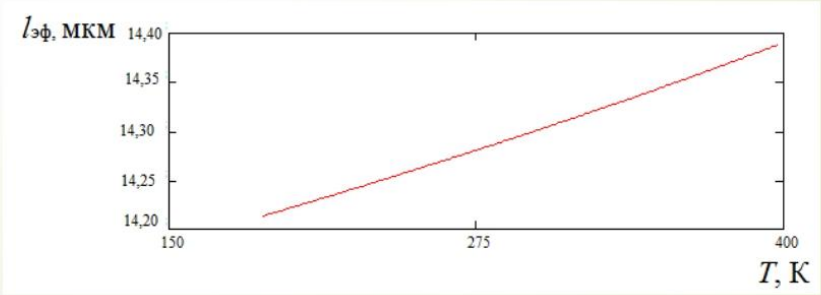
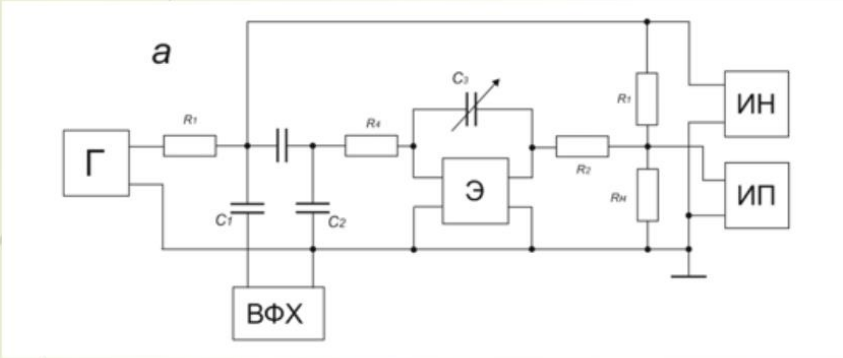


График зависимости эффективной длины канала от температуры

Электрическая функциональная схема измерения заряда поверхностных состояний полупроводника



Электрическая функциональная схема измерения зависимости $V_{sc}(V_з)$;

Г – генератор медленно меняющегося напряжения $V_з$; Э – электрометрический усилитель; ИН – индикатор напряжения $V_з$; ИП – источник питания $V_н = aV_{sc} + const$;

ВФХ – измеритель ВЧ ВФХ

$V_н = aV_{sc}(V_з) + const$ напряжение на нагрузочном сопротивлении

$$a = \frac{R_1^{-1}}{R_2^{-1} + R_н^{-1}};$$ Коэффициент a

$$\Delta Q_t^0 = -C_d * (V_з - V_{пз} - \frac{k*T}{q} * y_s - Q_{sc}(y_s)).$$

Изменение заряда поверхностных состояний

Расчет освещённости лаборатории по исследованию ВФХ МДП-структур

- Лаборатория имеет размеры: a = 25 м; b = 10 м; H = 4 м. Высота рабочих столов $h_{рс}$ = 0,8м, норма освещенности в лаборатории E равна 300 лк

  количество рядов светильников, равно 2.

$$n_р = \frac{b}{L_{нв}}$$

- Целесообразней выбрать лампы ЛДЦ 80-4, при использовании которых светильники заполняют ряд почти без разрывов.

$$E_р = \frac{300 * 3380 * 16 * 2}{106132} = 305,73 \text{ лм;}$$ Расчетная освещенность

$$\delta_{отн} = \frac{305,73 - 300}{300} * 100\% = 1,91\%$$ Относительная погрешность расчета

Спасибо за внимание!

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Заявление и протокол проверки ВКР на оригинальность в системе «Антиплагиат.ВУЗ»

государственного университета
А. Д. Гулякову
студента 4 курса ФИТЭ
очной формы обучения
Козина Алексея Сергеевича

ЗАЯВЛЕНИЕ

Я, Козин Алексей Сергеевич, студент 4 курса очной формы обученияна направления подготовки 11.03.04Электроника и наноэлектроника. Микроэлектроника и твердотельная электроника, прошу провести проверку с использованием системы«Антиплагиат» бакалаврскойвыпускной квалификационной работы на тему «Определение и моделирование параметров МДП- транзистора с подзатворным диэлектриком на основе оксида цинка», выполненной мной самостоятельно, на содержание элементов плагиата.

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

Я ознакомлен с действующим Стандартом университета «Выпускнаяквалификационная работа обучающихся по образовательным программамвысшего образования – программам бакалавриата, программам специалитетаи программам магистратуры», согласно которому обнаружение плагиатаявляется основанием для недопуска ВКР к защите и отчисления изуниверситета.

Козин А.С 16.06.2023

подпись студента дата

ВКР представлена на проверку 16.06.2023

Руководитель ВКР _____ А.Н. Головяшкин

проверки на оригинальность в системе «Антиплагиат.ВУЗ» выпускной квалификационной работы на тему «Разработка программного обеспечения для проектирования тонкопленочных конденсаторов»

студента 4 курса Козин А. С.

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

Пензенский государственный университет

ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНА В СИСТЕМЕ АНТИПЛАГИАТ.ВУЗ

Автор работы: Козин Алексей Сергеевич
Самоцитирование рассчитано для: Козин Алексей Сергеевич
Название работы: Определение и моделирование параметров МДП- транзистора с подзатворным диэлектриком на основе оксида цинка
Тип работы: Выпускная квалификационная работа
Подразделение: Кафедра "Нано- и микроэлектроника"

РЕЗУЛЬТАТЫ

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

СОВПАДЕНИЯ	22.55%	СОВПАДЕНИЯ	22.55%
ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	73.13%	ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	73.13%
ЦИТИРОВАНИЯ	4.32%	ЦИТИРОВАНИЯ	4.32%
САМОЦИТИРОВАНИЯ	0%	САМОЦИТИРОВАНИЯ	0%

ДАТА ПОСЛЕДНЕЙ ПРОВЕРКИ: 20.06.2023 — ДАТА И ВРЕМЯ КОРРЕКТИРОВКИ: 20.06.2023 09:10

Структура документа: Проверенные разделы: основная часть с.1-2, 4-18, 21-74, содержание с.3, 19-20, библиография с.75-80
Модули поиска: ИПС Адилет; Библиография; Сводная коллекция ЭБС; Интернет Плюс*; Сводная коллекция РГБ; Цитирование; Переводные заимствования (RuEn); Переводные заимствования по eLIBRARY.RU (EnRu); Переводные заимствования по коллекции Гарант: аналитика; Переводные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте; Переводные заимствования по Интернету (EnRu); Переводные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; Переводные заимствования издательства Wiley ; eLIBRARY.RU; СПС ГАРАНТ: аналитика; СПС ГАРАНТ: нормативно-правовая документация; IEEE; Медицина; Диссертации НББ; Коллекция НБУ; Перефразирования по eLIBRARY.RU; Перефразирования по СПС ГАРАНТ: аналитика; Перефразирования по Интернету; Перефразирования по Интернету (EN); Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте; Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; Перефразирования по коллекции

Работу проверил: Головяшкин Алексей Николаевич
ФИО проверяющего
Дата подписи: 20.06.2023
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

20 июня 2023 г. _____ Головяшкин А.Н.

АНТИПЛАГИАТ
ОБНАРУЖЕНИЕ ЗАИМСТВОВАНИЙ

СПРАВКА

Пензенский государственный университет

о результатах проверки текстового документа
на наличие заимствований

ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНА В СИСТЕМЕ АНТИПЛАГИАТ.ВУЗ

Автор работы: Козин Алексей Сергеевич
Самоцитирование рассчитано для: Козин Алексей Сергеевич
Название работы: Определение и моделирование параметров МДП- транзистора с подзатворным диэлектриком на основе оксида цинка
Тип работы: Выпускная квалификационная работа
Подразделение: Кафедра "Нано- и микроэлектроника"

РЕЗУЛЬТАТЫ

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

СОВПАДЕНИЯ	22.55%		СОВПАДЕНИЯ	22.55%	
ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	73.13%		ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	73.13%	
ЦИТИРОВАНИЯ	4.32%		ЦИТИРОВАНИЯ	4.32%	
САМОЦИТИРОВАНИЯ	0%		САМОЦИТИРОВАНИЯ	0%	

ДАТА ПОСЛЕДНЕЙ ПРОВЕРКИ: 20.06.2023

ДАТА И ВРЕМЯ КОРРЕКТИРОВКИ: 20.06.2023 09:10

Структура документа: Проверенные разделы: основная часть с.1-2, 4-18, 21-74, содержание с.3, 19-20, библиография с.75-80
Модули поиска: ИПС Адилет; Библиография; Сводная коллекция ЭБС; Интернет Плюс*; Сводная коллекция РГБ; Цитирование; Переводные заимствования (RuEn); Переводные заимствования по eLIBRARY.RU (EnRu); Переводные заимствования по коллекции Гарант: аналитика; Переводные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте; Переводные заимствования по Интернету (EnRu); Переводные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; Переводные заимствования издательства Wiley ; eLIBRARY.RU; СПС ГАРАНТ: аналитика; СПС ГАРАНТ: нормативно-правовая документация; IEEE; Медицина; Диссертации НББ; Коллекция НБУ; Перефразирования по eLIBRARY.RU; Перефразирования по СПС ГАРАНТ: аналитика; Перефразирования по Интернету; Перефразирования по Интернету (EN); Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте; Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; Перефразирования по коллекции

Работу проверил: Головяшкин Алексей Николаевич

ФИО проверяющего

Дата подписи: 20 июня 2023

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.

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

ОТЗЫВ

РУКОВОДИТЕЛЯ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Бакалаврская работа на тему «Определение и моделирование параметров МДП-транзистора с подзатворным диэлектриком на основе оксида цинка»

Выполнена студентом (ой) Козиным А.С.
(инициалы, фамилия)

Факультет информационных технологий и электроники

Кафедра Нано- и микроэлектроника Группа 19ПД1

Направление подготовки 11.03.04. «Электроника и наноэлектроника»,

Профиль подготовки «Микроэлектроника и твердотельная электроника»

Квалификация (степень) бакалавр

Руководитель Головяшкин А.Н.
(фамилия, имя, отчество)

доцент кафедры НиМЭ ПГУ
(должность и место работы)

Качества выпускника, выявленные в ходе выполнения бакалаврской работы

В ходе выполнения ВКР студент Козин А.С. продемонстрировал высокий уровень освоения профессиональных компетенций, связанных с основными областями профессиональной деятельности: проектно-конструкторской и производственно-технологической. При решении задач технического задания ВКР Козин А.С. показал хороший уровень теоретической и практической подготовки по основным базовым дисциплинам образовательной программы, а также способности выполнять задачи по получению и исследованию экспериментальных образцов элементов будущих компонентов электронной техники. В ходе выполнения работы были продемонстрированы отличные навыки работы с ПК, знание компьютерных технологий и умения использовать прикладное программное обеспечение для инженерных расчетов, разработки чертежей, оформления технической и текстовой документации. В период выполнения ВКР Козин А.С. продемонстрировал достаточную степенью самостоятельности, проявленную при решении конкретных задач представленной ВКР.

Заключение

Выполненная выпускником ВКР полностью 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 «отлично», а ее автор, Козин А.С., присвоения квалификации «бакалавр» по направлению подготовки 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника».

«14» июня 2023 г.

Руководитель _____ Головяшкин А.Н.
(подпись) (инициалы, фамилия)