

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Факультет
информационных технологий
и электроники
(наименование)

Кафедра
«Нано- и микроэлектроника»
(наименование)

Направление подготовки

11.04.04. «Электроника и
наноэлектроника»
(код и наименование)

Магистерская программа

Нано- и микроэлектроника
(наименование)

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему

Расчёт и моделирование параметров и характеристик биполярного транзистора с
изолированным затвором

Студент 21ПДм1
номер группы

Сидорова 05.06.23
подпись, дата

Сидорова Нина Сергеевна
ФИО полностью

Научный руководитель
к.т.н., доцент, ПГУ
должность, наименование организации

А.Н. Головяшкин 06.06.23
подпись, дата

А.Н. Головяшкин
инициалы, фамилия

Рецензент

Директор-главный конструктор ООО НПК «Крона
должность, наименование организации

В.Г. Ханбеков 29.06.23
подпись, дата

В.Г. Ханбеков
инициалы, фамилия

Нормоконтролер ст. преподаватель
должность

Т.Н. Рыжова 08.06.23
подпись, дата

Т.Н. Рыжова
инициалы, фамилия

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

Заведующий кафедрой НимЭ
профессор, ПГУ
должность, наименование организации

И.А. Пронин 19.06.23
подпись, дата

И.А. Пронин
инициалы, фамилия

Работа защищена с оценкой отл. (протокол ГЭК от 27.06.23 № 4)

Секретарь ГЭК

доцент, ПГУ
должность, наименование организации

А.А. Вольсков 27.06.23
подпись, дата

А.А. Вольсков
инициалы, фамилия

2023

год выпуска

РЕФЕРАТ

Пояснительная записка содержит 65 страниц, 25 рисунков, 1 таблицу, 9 источников.

Объектом исследования является биполярный транзистор с изолированным затвором.

Цель работы – расчёт предельных напряжений биполярного транзистора с изолированным затвором, оценка необходимости изменения структуры для увеличения пробойного напряжения.

В результате исследования были определены основные причины возникновения эффекта «защелкивания» структуры, составлен алгоритм расчёта для двух основных причин. Произведено моделирование тиристорной структуры БТИЗ в закрытом состоянии при обратном включении, рассчитано предельное напряжение при обратном включении. На основании полученных значений дана оценка необходимых изменений структуры при проектировании.

Ключевые слова: биполярный, транзистор, изолированный, затвор, эмиттер, коллектор, насыщение, тиристор, инжекция, накопление.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1 Описание структуры и принципа действия биполярного транзистора сизолированным затвором (БТИЗ)	6
2 Эффект «защелкивания структуры»	20
3 Моделирование тиристорной структуры в закрытом состоянии при обратном включении	27
4 Проектирование тиристорной основы	34
4.1 Выбор полупроводникового материала	34
4.2 База p -типа	36
4.3 База n -типа	41
4.4 Эмиттеры p - и n -типа	46
5 Анализ условий зрительной работы при работе с ПЭВМ	47
Заключение	50
Список использованных источников	52
Приложение А. Лист задания ВКР	53
Приложение Б. Программа расчёта в среде программирования <i>MathCAD</i>	65
Приложение В. Публикации по теме ВКР	67
Приложение Г. Иллюстративная часть	57
Приложение Е. Антиплагиат	80

ВВЕДЕНИЕ

Полупроводниковый ключ в современной электронике является одним из важнейших элементов. Основные принципы работы данных приборов используются практически во всех бестрансформаторных преобразователях тока и напряжения, инверторах, частотных преобразователях и т.д. Их применение дает возможность существенно упростить схему, уменьшить размеры и улучшить технические характеристики. Для применения такого прибора в силовой электронике, чтобы избежать использование цепей питания управляющего электрода, была предложена структура биполярного транзистора с изолированным затвором, где управление осуществляется небольшим напряжением. Основная область их применения – мощные, высоковольтные схемы.

Серьёзным недостатком БТИЗ является возникновение «эффекта защелкивания» структуры. Этот эффект возникает при работе в режиме прямого включения. Он заключается в том, что транзистор может продолжать удерживать высокий ток, даже если сигнал на затвор прекращен. В результате транзистор не переходит в режим отсечки и продолжает пропускать ток, что может привести к перегреву устройства и его повреждению. Для предотвращения появления данного эффекта необходимо разобраться в причинах его возникновения и провести анализ структуры на предмет того какие параметры необходимо изменять при проектировании устройства.

Также одним из важных параметров который нужно учитывать является напряжение пробоя при обратном включении. БТИЗ при обратном смещении находится в закрытом состоянии. Расчёт напряжения пробоя при обратном включении позволяет оценить риск при проектировании.

Все расчёты будут произведены с взятыми из свободных источников значениями концентрации примесей. Это позволит получить более наглядные зависимости. Но при реальном проектировании и разработке структуры расчёты основываются на заданном значении необходимого рабочего

напряжения. Следовательно, необходимо решить прямую задачу – поиск параметров структуры, при которых будет реализовано необходимое значение рабочего напряжения. Задача, поставленная в этой работе – получение значений концентрации примеси в базе при которых, теоретически, полностью исключается возможность появления «эффекта защелкивания» структуры. Также при подборе необходимо учитывать возможность смыкания областей объемного заряда.

Цель данной работы – подробно изучить причины возникновения эффекта защелкивания структуры и составление модели расчёта предельных напряжений. На основании данной модели дать оценку по необходимости изменения структуры для увеличения напряжения пробоя. Получить методику, позволяющую установить связь между параметрами структуры и появлением тиристорного эффекта.

1 Описание структуры и принципа действия биполярного транзистора с изолированным затвором (БТИЗ)

На данный момент самыми распространёнными приборами силовой электроники в области коммутируемых токов до 50 А и напряжений до 500 В являются биполярные транзисторы и транзисторы с изолированным затвором. Для работы с большими уровнями токов и напряжениями до единиц киловольт используются биполярные транзисторы с изолированным затвором.

Биполярный транзистор с изолированным затвором (БТИЗ, англ. *Insulated gate bipolar transistor, IGBT*) — трёхэлектродный силовой полупроводниковый прибор, сочетающий два транзистора в одной полупроводниковой структуре: биполярный (образующий силовой канал) и полевой (образующий канал управления). Это полностью управляемый полупроводниковый прибор. Его включение и выключение осуществляются подачей и снятием положительного напряжения между затвором и истоком.

Первый промышленный образец БТИЗ был запатентован *International Rectifier* в 1983 году. Позднее, в 1985 году, был разработан БТИЗ с полностью плоской структурой (без V-канала) и более высокими рабочими напряжениями. Это произошло почти одновременно в лабораториях фирм *General Electric* (Скенектади, штат Нью-Йорк) и *RCA* (Принстон, штат Нью-Джерси). Первоначально устройство называли *COMFET*, *GEMFET* или *IGFET*. В 1990-е годы приняли название *IGBT*. Первые БТИЗ не получили распространения из-за врождённых пороков: медленного переключения и низкой надёжности. Последующие поколения избавились от этих пороков [1].

С 80-х годов прошлого века и по сегодняшний день создано четыре поколения этих приборов: первое поколение – с 1985 года, когда были достигнуты максимальные значения напряжения $U_{\text{макс}} = 1000 \text{ В}$, тока $I_{\text{макс}} \approx 25 \text{ А}$ и минимальное значение времени переключения $t_{\text{пер}} \approx 1 \text{ мкс}$;

второе – с 1990 года, когда были достигнуты максимальные значения $U_{\text{макс}} = 1600 \text{ В}$, $I_{\text{макс}} \approx 50 \text{ А}$ и минимальное значение времени переключения $t_{\text{пер}} \approx 0,5 \text{ мкс}$; третье – с 1994 года, когда были достигнуты максимальные значения напряжения $U_{\text{макс}} = 3500 \text{ В}$, тока $I_{\text{макс}} \approx 100 \text{ А}$ и минимальное значение времени переключения $t_{\text{пер}} \approx 0,25 \text{ мкс}$ и, наконец, четвертое поколение – с 1998 года, для которого характерны следующие достижения: $U_{\text{макс}} = 4500 \text{ В}$, $I_{\text{макс}} \approx 150 \text{ А}$, время переключения $t_{\text{пер}} \approx 0,5 \text{ мкс}$.

У современных БТИЗ входное пробивное напряжение теоретически составляет около 80 В. Максимальные токи, которые могут коммутировать современные БТИЗ, находятся в пределах от 7 до 150 А. Для больших мощностей выпускаются составленные из нескольких транзисторов модули с предельными значениями тока до 1000 А. Пробивные напряжения БТИЗ находятся в пределах от 400В до 4500 В [2].

Условное обозначение БТИЗ похоже на условное обозначение биполярного транзистора, только со стороны базы дополнительно указан затвор. УГО биполярного транзистора с изолированным затвором представлено на рисунке 1.1

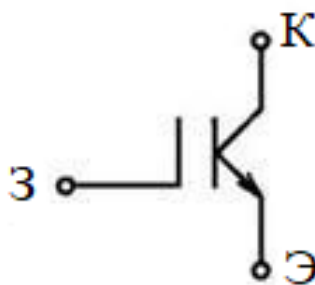


Рисунок 1.1 – УГО биполярного транзистора с изолированным затвором

Для понимания структуры и принципа действия биполярного транзистора с изолированным затвором необходимо разобрать структуру и принцип действия различных диодных структур.

Тиристор – это полупроводниковый прибор с двумя устойчивыми состояниями, имеющий три или более выпрямляющих перехода, который способен переключаться из закрытого состояния в открытое и наоборот [3].

Диодный тиристор (динистор) – это тиристор, имеющий два вывода через которые проходит как основной ток, так и ток управления (рисунок 1.2) [3].

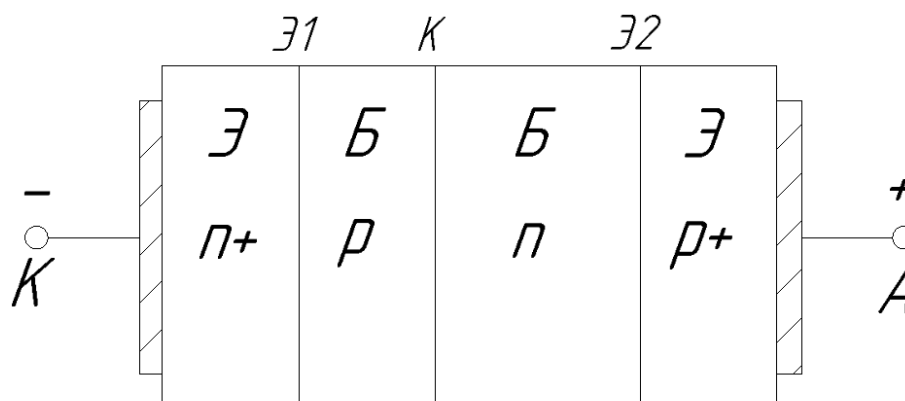


Рисунок 1.2 – Структура диодного тиристора

На рисунке 1.2 представлена структура динистора. Эмиттерные переходы являются резко несимметричными. Полярность соответствует прямому включению. При обратном включении была бы характеристика обычного диода.

Быстродействие тиристора зависит от сопротивления базовых областей. В свою очередь сопротивление базовой области зависит от толщины и концентрации примеси. Одна из баз является более низкоомной, благодаря этому они обе будут выдерживать необходимое напряжение.

Рассмотрим какие процессы происходят в динисторе при прямом включении. Эмиттеры будут смещены в прямом направлении. Коллектор – в обратном. Электроны будут инжектироваться из эмиттера в p -базу, где они становятся неосновными. Коллекторный переход начинает втягивать инжектированные носители и переправлять их в базу n -типа, где они становятся основными. Второй эмиттерный переход они не пройдут, потому что он резко несимметричен. Такой переход производит одностороннюю инжекцию. Для электронов в n -базе высота потенциального барьера высокая и будет происходить их накопление. База начинает заряжаться отрицательно. При этом носители не переполняются из-за процессов рекомбинации.

Тиристор при прямом включении остается закрытым так как носители «застревают» на противоположных переходах. В связи с этим прямой ток маленький. На графике (рисунок 1.3) это участок 1.

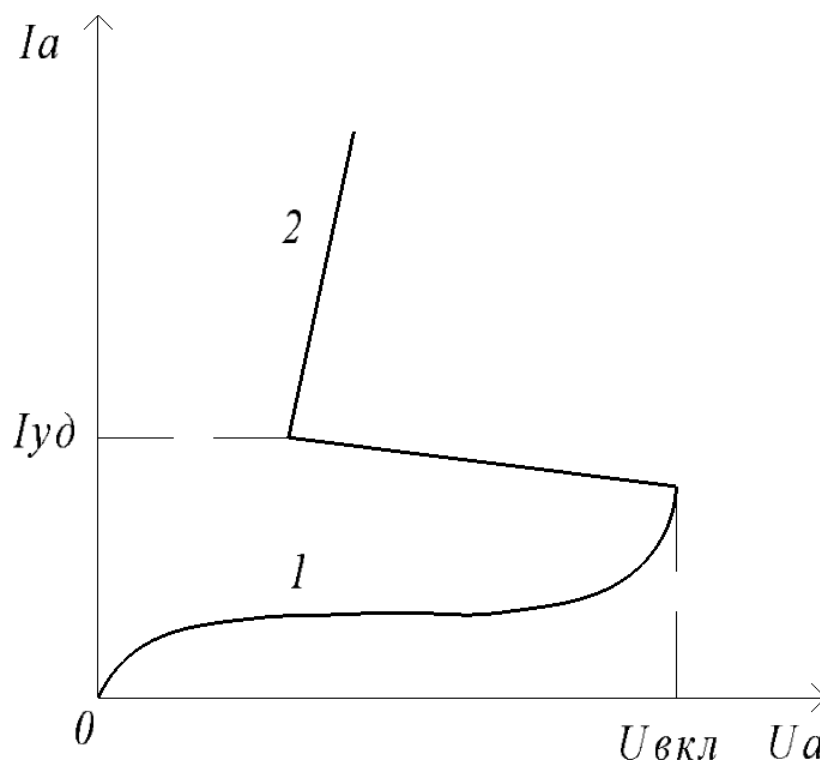


Рисунок 1.3 – Вольт-амперная характеристика диода

Большая часть подаваемого напряжения падает на коллекторном переходе, поэтому на эмиттерных очень низкие прямые напряжения. Структура последовательная, ток в каждой точке будет одинаковый. При этом он медленно нарастает. Небольшое увеличение напряжения на эмиттерах вызывает небольшое увеличение потока носителей. Уровень накопления электронов в n -базе и дырок в p -базе тоже увеличивается. Начинает сказываться процесс накопления носителей заряда в базах. Это приводит к тому что увеличивается прямое смещение эмиттерных переходов. Они открываются еще больше и «впрыскивают» электроны. Происходит дальнейшее накопление. Этот процесс — положительная обратная связь. Прямой ток резко увеличивается. При напряжении включения происходит открытие тиристора. Коллекторный переход сместится в прямом направлении и все напряжение что на нем падало распределится между всей структурой одинаково. Так как напряжение не сможет быть меньше контактной разности потенциалов остаток

будет падать на объемном сопротивлении всей структуры. Произойдет резкий обратный скачок напряжения в сторону меньших значений. При трех открытых переходах суммарное сопротивление становится меньше и прямой ток ограничен только сопротивлением внешней цепи и объемным сопротивлением базовых областей.

Чтобы перевести тиристор из открытого состояния в закрытое необходимо уменьшить накопленный заряд в базовых областях.

В закрытом состоянии ток через тиристор выражается:

$$I_{п2} = \alpha_1 I_{п1} + \alpha_2 I_{п3} + I_{к60}, \quad (1.1)$$

где $I_{п2}$ – ток через коллекторный переход, $I_{п1}$ – ток через первый эмиттерный переход, $I_{п3}$ – ток через второй эмиттерный переход, α_1 , α_2 – статические коэффициенты передачи первого и второго эмиттерных переходов.

Так как $I_{п1} = I_{п2} = I_{п3} = I_a$ выражение (1) можно преобразовать и получить уравнение ВАХ динистора в закрытом состоянии:

$$I_a = I_{к60}(1 - \bar{\alpha}), \quad (1.2)$$

где $\bar{\alpha}$ – суммарный статический коэффициент передачи тока всей тиристорной структуры.

Из уравнения (1.2) можно сделать вывод, что если $\bar{\alpha} \rightarrow 1$, то $I_a \rightarrow \infty$. Это является формальным условием перехода тиристора из закрытого состояния в открытое. В практических схемах ток должен быть ограничен сопротивлением нагрузки его цепи, иначе будет интенсивный разогрев.

Диодный тиристор имеет существенный недостаток – мягкая характеристика переключения. Для её исключения используют шунтирование одного из эмиттерных переходов. Структура такого тиристора представлена на рисунке 1.4.

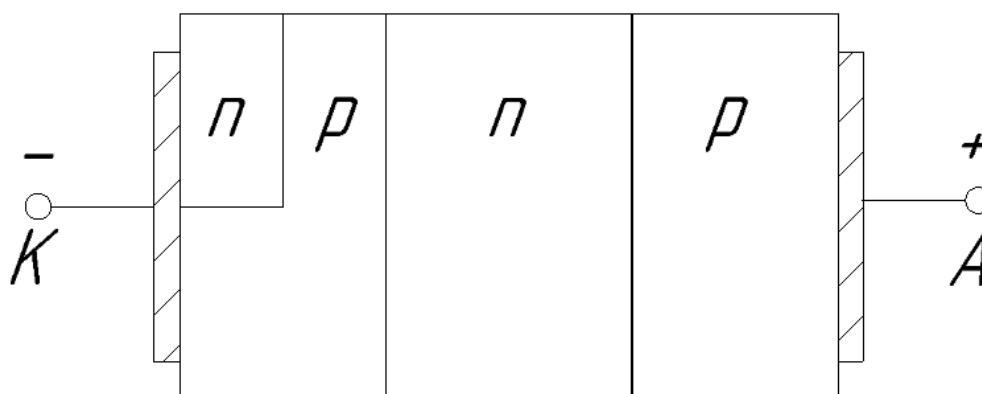


Рисунок 1.4 – Структура диодного тиристора с зашунтированным эмиттерным переходом

При малых значениях напряжения сопротивление базовой области меньше, чем эмиттерной, поэтому почти весь ток будет проходить по шунтирующему сопротивлению базы. При увеличении напряжения сопротивление эмиттерного перехода со стороны катода становится меньше, чем сопротивление высокоомной базы. Практически весь ток будет проходить через эмиттерный переход и будет связан с инжекцией неосновных носителей заряда в прилегающую p -базу. С одной стороны, происходит уменьшение начального значения коэффициента передачи. С другой получается более сильная зависимость коэффициента передачи тока эмиттера от прямого напряжения. Чем сильнее зависимость – тем более жесткая характеристика переключения.

Для управления коэффициентом передачи используют дополнительный электрод. Тиристор с дополнительным электродом называется триодным.

Триодный тиристор (тринистор) – это тиристор, имеющий два основных, и один управляющий электрод. Структурная схема представлена на рисунке 1.5 [3].

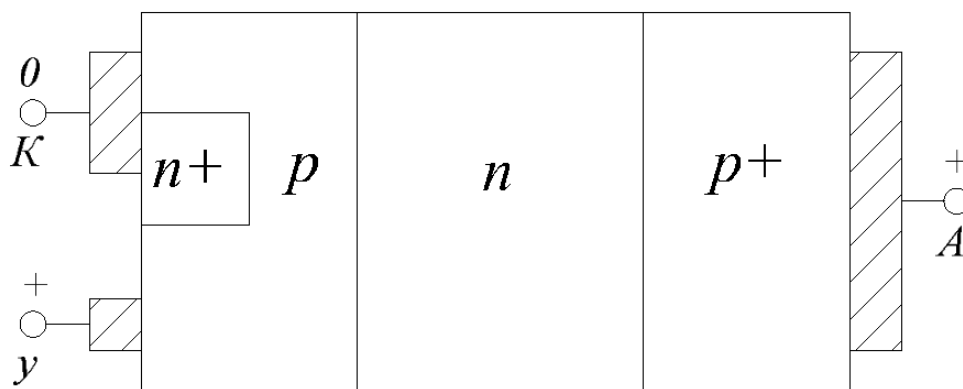


Рисунок 1.5 – Структурная схема триодного тиристора

Как показано на рисунке 1.5, дополнительный электрод наносится на базовую область. Он называется управляющим. При подаче на него положительного потенциала увеличивается прямое напряжение эмиттерного перехода со стороны катода. Это способствует увеличению уровня инжекции первого эмиттерного перехода. Коллекторный переход смещается в прямом направлении намного раньше. Таким образом тринистор можно переключать из закрытого состояния в открытое в необходимый момент времени даже при небольшом напряжении на аноде.

Максимальное напряжение включения тиристор будет иметь при $I_y = 0$.

Управляющий электрод дает большое преимущество, так как с помощью него можно управлять напряжением включения. Но при этом есть важный для силовой электроники недостаток – большие токи переключения. Для мощных, силовых приборов это неудобно, необходимо иметь цепь питания управляющего электрода. К тому же будут большие потери по мощности. Поэтому для использования прибора в силовой электронике была предложена структура биполярного транзистора с изолированным затвором. Название данного устройства не отражает принцип его действия, но мы все равно будем его использовать так как альтернативы нет.

Структура БТИЗ представлена на рисунке 1.6.

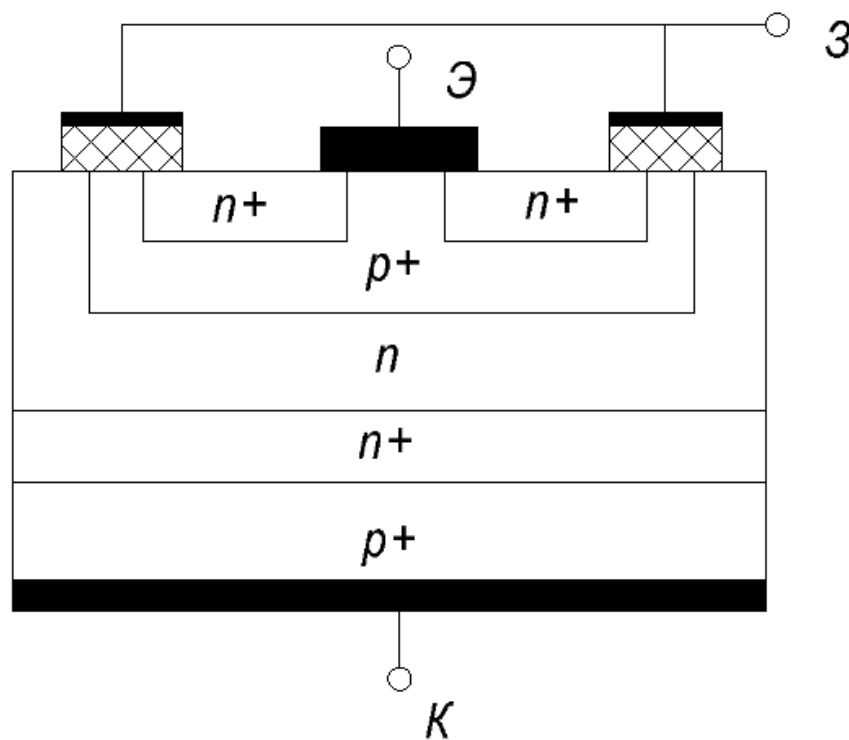


Рисунок 1.6 – Структура БТИЗ

Рассмотрим подробнее структуру. Также, как и у динисторной структуры, мы видим первый эмиттерный переход (со стороны эмиттера), коллекторный переход (p^+-n) и второй эмиттерный переход (со стороны коллектора). Со стороны затвора область эмиттера имеет сильное шунтирование с базовой областью. Это сделано для снижения коэффициента передачи.

Затворы выполняют здесь роль управляющих электродов, только расположены они не прямо на базе, а через изоляцию.

Базовая область разбита на две – n и n^+ . Это сделано для уменьшения сопротивления.

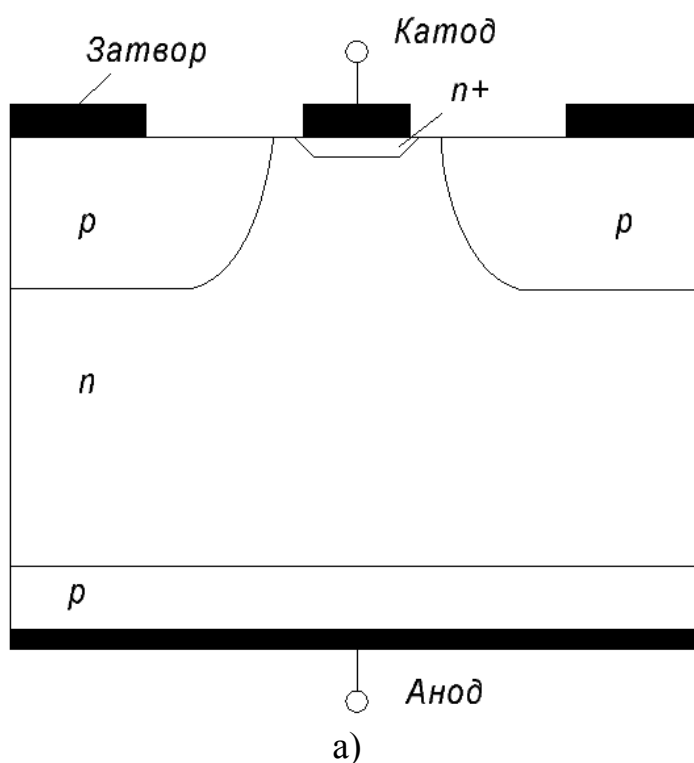
Получается, что без подачи напряжения на затворы принцип действия биполярного транзистора с изолированным затвором не будет отличаться от обычного динистора с зашунтированным эмиттерным переходом, описанным ранее. Будет накопление заряда в базах, после чего при напряжении включения тиристор откроется, коллекторный переход сместится в прямом направлении и начнется двухсторонняя инжекция.

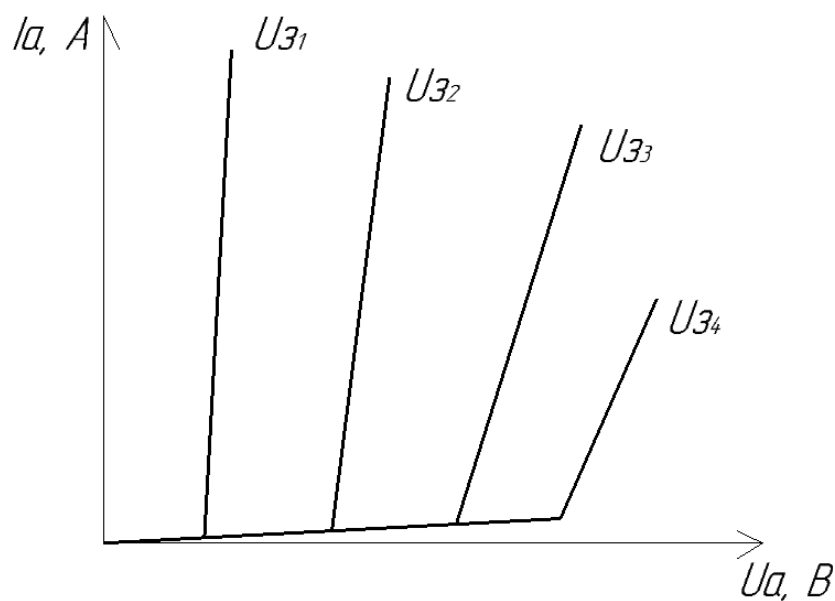
При подаче напряжения на затвор формируется проводящий канал и через него происходит прямой приток носителей в базу.

После чего идет их накопление, и дальше принцип действия не отличается от обычного тиристора.

Можно сказать, что в некоторой степени БТИЗ является совмещением двух тиристоров – тринистора и тиристора, управляемого полем (тиристор со статической индукцией).

Структура тиристора со статической индукцией (СИТ) похожа на структуру тринистора, но принцип действия кардинально отличается. Он, по сути, не является тиристором. СИТ выполняет функции обычного полупроводникового выпрямителя. Его структура и статическая ВАХ представлены на рисунке 1.7.





б)

а – структура; б – статическая ВАХ

Рисунок 1.7 –Тиристор, управляемый полем

Данный прибор при нулевом смещении на затворе работает как обычной диод. При обратном смещении на затворе область объемного заряда около затвора перекрывает проводящий канал и прекращает движение тока.

Для того чтобы перевести СИТ в полностью открытое состояние необходимо убрать напряжение с затвора, или падать на него прямое смещение.

Биполярный транзистор с изолированным затвором и тиристор со статической индукцией похожи принципом действия затвора. Смещение на затворе влияет на открытие того или иного прибора. В случае БТИЗ напряжение на затворе увеличивает скорость накопления носителей заряда в базе, от чего уменьшается значение напряжения включения прибора. У тиристора, управляемого полем наоборот. Обратное смещение на затворе увеличивает напряжение, при котором тиристор начинает проводить ток.

То есть при создании биполярного транзистора с изолированным затвором объединили идею управления включением с помощью напряжения на управляющем электроде (затворе) со всем известной и давно изученной структурой обычного триодного тиристора.

Главное заблуждение при изучении работы БТИЗ является то, что тиристор закрыт из-за обратного смещения коллекторного перехода. Полагают, что речь идет об обратном смещении коллекторного перехода транзистора, а не тиристора. Тиристорная структура находится в закрытом состоянии, потому что не происходит инжекция из баз в эмиттеры. Носители заряда не могут преодолеть высокий потенциальный барьер и происходит их накопление. Открытие коллекторного перехода необходимо для того чтобы убрать с него обратное напряжение. Как только это происходит напряжение падает на эмиттерах и начинает происходить инжекция.

Основные нежелательные эффекты, происходящие в БТИЗ, связаны с выходом из диапазона области безопасной работы. А именно с превышением максимально допустимого входного напряжения.

Неприятной особенностью БТИЗ является эффект «защелки», который связан с наличием динисторной основы.

При разработке электронных схем с использованием БТИЗ, в которых возможна такая ситуация, особое внимание следует уделять ограничению максимальных токов и предельной скорости нарастания напряжения dU/dt , что не приводит к самопроизвольному открытию транзистора. Для ограничения тока короткого замыкания в аварийном режиме рекомендуется включить защитную цепь между затвором и эмиттером, которая предотвращает увеличение напряжения затвор–эмиттер при резком увеличении тока коллектора. Наилучшим вариантом является параллельное подключение схемы затвор–эмиттер с последовательно включенными диодом Шоттки и конденсатором, заряженным до напряжения +15...+16 В. В качестве защитного элемента допускается использовать стабилитрон напряжением 15...16 В.

Затвор БТИЗ электрически изолирован от канала очень тонким слоем диэлектрика и может быть легко поврежден при неправильной эксплуатации. Для нормальной активации и перевода БТИЗ в состояние насыщения при обеспечении минимальных потерь в этом состоянии требуется заряд входной емкости устройства (1000 ... 5000 пФ) требуется напряжение до + 15 В ± 10%.

Перевод устройства в закрытое состояние может осуществляться как путем подачи нулевого напряжения, так и отрицательного – не более -20 В (обычно в пределах -5 ... -6 В). Максимально допустимое напряжение затвор – эмиттер не должно превышать +20 В. Превышение этого напряжения может нарушить изоляцию затвора и вывести устройство из строя. Не рекомендуется, чтобы БТИЗ работал даже с "подвешенными" затвором, поскольку в противном случае устройство может быть включено неправильно.

Чтобы уменьшить динамические потери и увеличить частоту переключения, необходимо обеспечить короткое время переключения устройства. Время переключения для большинства ключей на БТИЗ находится в пределах 100...1000 нс, что требует кратковременной подзарядки входной емкости с использованием пиков тока до 5 А и более. Также необходимо уменьшить отрицательную обратную связь, которая может возникнуть из-за индуктивности чрезмерно длинного соединительного проводника с излучателем устройства.

Длина соединительных проводов между схемой управления и мощным полевым транзистором должна быть минимальной, чтобы исключить помехи в цепи управления. Для подключения рекомендуется использовать витую пару минимальной длины или прямой монтаж платы управления к управляющим клеммам транзистора. Если невозможно избежать длинных проводников в цепи затвора, то в качестве меры предосторожности необходимо включить резистор с небольшим сопротивлением последовательно с затвором. Обычно достаточно, чтобы сопротивление этого резистора находилось в диапазоне 100... 200 Ом. Следует отметить, что БТИЗ не так чувствительны к электростатическому пробое, как, например, КМОП-устройства, из-за того, что входная мощность мощных БТИЗ намного больше и они могут вместить больше энергии до того, как разряд вызовет необратимый пробой затвора. Однако при транспортировке и хранении этих устройств затвор и вывод эмиттера должны быть закорочены токопроводящими перемычками, которые нельзя снимать до тех пор, пока транзистор не будет подключен к цепи. Монтажные работы с БТИЗ необходимо

выполнять только при наличии антистатического браслета. Все инструменты и принадлежности, с которыми может соприкасаться модуль, должны быть заземлены. Чтобы защитить затвор от статического пробоя непосредственно в цепи, необходимо параллельно цепи затвор – эмиттер подключить резистор сопротивлением 10...20 Ком.

Если говорить о достоинствах и недостатках БТИЗ по сравнению с тиристором, то сразу выделяется огромный плюс, а именно – возможность использования данного прибора для коммутации токов большого значения (от 7 до 100 А) без тока управления и потребления электрической мощности управляющей цепи БТИЗ. Благодаря этому данный прибор нашел широкое применение в качестве ключей внутри тяговых преобразователей (силовых модулей для увеличения производительности привода) электровозов, трамваев и троллейбусов.

При сравнении основных технических характеристик БТИЗ и тиристора одинаковой мощности можно сделать вывод, что время задержки включения и время выключения у биполярного транзистора с изолированным затвором намного меньше. Разница составляет около порядка [4].

И в заключении данного раздела несколько слов о терминологии. Мы считаем, что название данного компонента (биполярный транзистор с изолированным затвором), является крайне неудачным. Во-первых, было показано, что при отсутствии изолированного управляющего электрода структура представляет собой обычный диодистор. То-есть его уже нельзя называть биполярным транзистором. Во-вторых, понятие «затвор», согласно действующим ГОСТам на электронные компоненты, применимо только к полевым транзисторам [5]. В-третьих, данное название вообще не отражает принцип действия и структуру данного компонента. Поэтому там, где необходимо подчёркивать особенности его параметров, характеристик или структуры, мы будем его называть «тиристор с изолированным управляющим электродом». В остальных случаях, для краткости, будем использовать общепринятую аббревиатуру БТИЗ.

По этим же причинам схемное условное изображение этого компонента (рисунок 1.1) также является неудачным и противоречит действующим стандартам [6]. Ведь для прямого смещения на условный эмиттер БТИЗ следует подавать отрицательный потенциал (для тиристора этот электрод является катодом), а на изображении показан эмиттер биполярного транзистора *p-n-p* транзистора, то есть обратной полярности [7]. Но данное изображение уже прочно закрепилось в промышленности, поэтому мы будем вынуждены его использовать и далее.

2 Эффект «защелкивания структуры»

Защелкивание структуры – тиристорный эффект, связанный не с закрытием тиристора, а наоборот. При переходе паразитного тиристора в открытое состоянии обратить процесс крайне тяжело. Процессы, происходящие при прямом включении, регенерируют заряд и если скорость регенерации заряда будет выше чем скорость вывода носителей через управляющий электрод – тиристор останется в открытом состоянии.

Переход тиристора в открытое состояние происходит по трём причинам:

1. Накопление носителей заряда в базах. Из-за разной степени легирования областей эмиттерные переходы резко несимметричные и инжекция со стороны базы затруднена, а при низких напряжениях вовсе отсутствует. При этом при увеличении напряжения прямого смещения, так как обратно смещенный коллекторный переход, формально, имеет высокое дифференциальное сопротивление, вся прибавка напряжения падает на нём и на эмиттере ничего не увеличивается. Смещение коллекторного перехода в открытое состояние необходимо не потому, что он мешает прохождению тока, а потому что он оттягивает на себя все внешнее напряжение. Как только происходит смещение коллекторного перехода в открытое состояние – напряжение падает на эмиттерных переходах, сопротивление становится очень низким и начинается беспрепятственная двухсторонняя инжекция.

2. Лавинное умножение носителей заряда. Если сильно понизить коэффициенты передачи – обратное напряжение на коллекторном переходе может стать таким высоким, что начнется процесс ударной ионизации. В результате обратное напряжение начинает уменьшать сопротивление коллектора и тогда прибор может перейти в предпробойное состояние.

В результате лавинного умножения тока начинает резко увеличиваться уровень заряда основных носителей в базах. Понижается барьер на эмиттерных переходах. Накопленный заряд играет двойную роль в базах. С одной стороны повышается эмиттерное напряжение и уменьшается барьер, с другой стороны

понижается обратное напряжение коллектора. Если интенсивность процессов ударной ионизации будет высокая, то заряда хватит на открытие тиристора.

3. Комбинированный метод. Включение происходит за счёт накопления носителей заряда и лавинного умножения. Между двумя этими процессами существует положительная обратная связь.

Для оценки причины возникновения эффекта «защелки» необходимо смоделировать каждый случай отдельно.

В первом случае, когда причиной открытия паразитного тиристора служит накопление носителей заряда в базах, необходимо для расчёта использовать классическое условие открытия тиристора. Тиристор перейдет в открытое состояние, когда сумма коэффициентов передачи двух комплементарных транзисторов окажется равной единице (2.1).

$$|\alpha_{pnp}| + |\alpha_{npn}| = 1, \quad (2.1)$$

где α_{pnp} – коэффициент передачи комплементарного транзистора $p-n-p$; α_{npn} – коэффициент передачи комплементарного транзистора $n-p-n$.

Задача заключается в нахождении напряжения при котором будет выполняться данное условие. Следовательно, оба коэффициента передачи должны иметь зависимость от напряжения.

Для простоты понимания и дальнейшего использования были введены определенные обозначения областей и $p-n$ -переходов:

1. Область эмиттера ($\mathcal{E}_1$) – область со стороны изолированного электрода.
2. Область базы ($\mathcal{B}_1$) – область, где образуется проводящий канал.
3. Область базы ($\mathcal{B}_2$).
4. Область эмиттера ($\mathcal{E}_2$) – область со стороны вывода коллектора.
5. E_1 – первый эмиттерный переход.
6. K – коллекторный переход.
7. E_2 – второй эмиттерный переход.

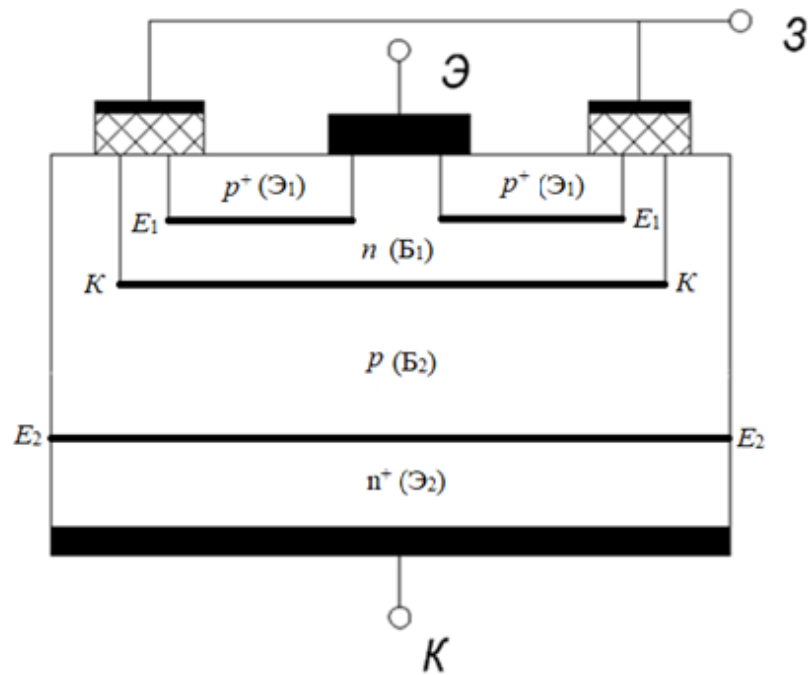


Рисунок 2.1 – Структура БТИЗ

Необходимо ввести некоторые исходные данные:

$N_{Б1}, N_{Б2} = 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ – концентрация примеси в базах;

$N_{Э1}, N_{Э2} = 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ – концентрация примеси в эмиттерах;

$\tau_p = 3 \text{ мкс}, \tau_n = 0,3 \text{ мкс}$ – время жизни неосновных носителей заряда

Толщина базы рассчитывается с учетом возможности смыкания областей.

Поэтому ее принимают в 2 раза большей толщины области пространственного заряда. Формула для толщины ОПЗ:

$$\delta(U) = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0 U}{qN_B}}, \quad (2.2)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость; ε_0 – диэлектрическая постоянная; U – внешнее напряжение.

Соответственно, толщина базы:

$$W_B = 2 \cdot \delta_{N2} \quad (2.3)$$

Расчёт α_{npn}

Концентрации неосновных носителей найдены с помощью закона действующих масс:

$$22 \quad (2.4)$$

$$n_{p0э} = \frac{n_i^2}{N_{P1}},$$

где n_i – собственная концентрация в кремнии.

$$n_{p0э} = \frac{(2 \cdot 10^{10})^2}{3 \cdot 10^{13}} = 1,33 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$$

$$p_{n0б} = \frac{n_i^2}{N_{N1}} \quad (2.5)$$

$$p_{n0б} = \frac{(2 \cdot 10^{10})^2}{1 \cdot 10^{16}} = 4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$$

Коэффициент диффузии:

$$D_P = \frac{\mu_P kT}{q} = 3,25 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^{-3}}{\text{с}}, \quad (2.6)$$

$$D_N = \frac{\mu_N kT}{q} = 1,5 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^{-3}}{\text{с}}, \quad (2.7)$$

где μ_P , μ_N – подвижность дырок и электронов; k – коэффициент Больцмана; T – температура; q – заряд электрона.

Подвижность определена с помощью графика зависимости от концентрации носителей заряда: $\mu_N = 1300 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$; $\mu_P = 500 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

$$D_P = \frac{500 \cdot 1,23 \cdot 10^{-23} \cdot 273}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 1,5 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^{-3}}{\text{с}}$$

$$D_N = \frac{1300 \cdot 1,23 \cdot 10^{-23} \cdot 273}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 3,25 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^{-3}}{\text{с}}$$

Диффузионная длина:

$$L_{N1} = \sqrt{D_{N1} \cdot \tau_{N1}} \quad (2.8)$$

$$L_{P1} = \sqrt{D_{P1} \cdot \tau_{P1}} \quad (2.9)$$

$$L_{N1} = \sqrt{3,25 \cdot 10^{-3} \cdot 0,3 \cdot 10^{-6}} = 6,708 \cdot 10^{-5} \text{ м}$$

$$L_{P1} = \sqrt{1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 3 \cdot 10^{-6}} = 3,122 \cdot 10^{-5} \text{ м}$$

Коэффициенты передачи эмиттерных переходов двух комплиментарных транзисторов найдены по формуле:

$$\alpha(U) = \gamma(U) \alpha_{\Pi}(U) \alpha^* \quad (2.10)$$

где $\gamma(U)$ – эффективность эмиттера, показывающая долю инжектированных в базу носителей заряда в общем токе эмиттера.

$$\gamma \approx 1 - \frac{n_{p0э} D_n W_B(U)}{p_{n0б} D_p L_n} \quad (2.11)$$

$\alpha_{\Pi}(U)$ – коэффициент переноса, показывающий, какая часть инжектированных в базу носителей заряда доходит до коллекторного перехода.

$$\alpha_{\Pi} \approx 1 - \frac{W_B(U)^2}{2L_p} \quad (2.12)$$

α^* - эффективность коллектора, показывающая, во сколько раз ток коллектора возрастает из-за наличия в обратном токе коллекторного перехода составляющей, зависящей от тока эмиттера. Обычно это значение принимают равным единице.

Расчёт $\alpha_{пр}$

Концентрации неосновных носителей найдены с помощью закона действующих масс (2.4):

$$n_{p0э} = \frac{(2 \cdot 10^{10})^2}{1 \cdot 10^{16}} = 4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$$

$$p_{n0б} = \frac{(2 \cdot 10^{10})^2}{3 \cdot 10^{13}} = 1,33 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$$

Коэффициент диффузии (2.6; 2.7):

$$D_p = \frac{500 \cdot 1,23 \cdot 10^{-23} \cdot 273}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 3,25 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$$

$$D_n = \frac{1300 \cdot 1,23 \cdot 10^{-23} \cdot 273}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 1,5 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$$

Диффузионная длина (2.8; 2.9):

$$L_{N1} = \sqrt{3,25 \cdot 10^{-3} \cdot 0,3 \cdot 10^{-6}} = 6,708 \cdot 10^{-5} \text{ м}$$

$$L_{P1} = \sqrt{1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 3 \cdot 10^{-6}} = 3,122 \cdot 10^{-5} \text{ м}$$

Было подобрано напряжение, при котором в заданных условиях сумма коэффициентов передачи транзисторов *PNP* и *NPN* равна единице.

Расчёт коэффициента передачи транзистора *PNP*:

$$\delta_n(641\text{В}) = \sqrt{\frac{2 \cdot 12 \cdot 8,86 \cdot 10^{-14} \cdot 641}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3 \cdot 10^{13}}} = 5.353 \cdot 10^{-5}\text{м}$$

$$W_N = 2 \cdot 5.353 \cdot 10^{-5} = 1,136 \cdot 10^{-4}\text{м}$$

$$\gamma(641\text{В}) \approx 1 - \frac{4 \cdot 10^{11} \cdot 3,25 \cdot 10^{-3} \cdot 1,136 \cdot 10^{-4}}{4 \cdot 10^{11} \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 6,708 \cdot 10^{-5}} =$$

$$\alpha_{\Pi}(641\text{ В}) \approx 1 - \frac{(1,136 \cdot 10^{-4})^2}{2 \cdot 6,708 \cdot 10^{-5}} =$$

$$\alpha_{npn}(641\text{ В}) = \gamma(U)\alpha_{\Pi}(U) = 0,507$$

Расчёт коэффициента передачи транзистора *PNP*:

$$\delta_n(641\text{В}) = \sqrt{\frac{2 \cdot 12 \cdot 8,86 \cdot 10^{-14} \cdot 641}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3 \cdot 10^{13}}} = 5.353 \cdot 10^{-5}\text{м}$$

$$W_N = 2 \cdot 5.353 \cdot 10^{-5} = 1,136 \cdot 10^{-4}\text{м}$$

$$\gamma(641\text{В}) \approx 1 - \frac{1,33 \cdot 10^{14} \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,136 \cdot 10^{-4}}{4 \cdot 10^{11} \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 3,122 \cdot 10^{-5}} =$$

$$\alpha_{\Pi}(641\text{ В}) \approx 1 - \frac{(1,136 \cdot 10^{-4})^2}{2 \cdot 3,122 \cdot 10^{-5}} =$$

$$\alpha_{pnp}(641\text{ В}) = \gamma(U)\alpha_{\Pi}(U) = 0,507$$

Условие $|\alpha_{pnp}| + |\alpha_{npn}| = 1$ выполняется при напряжении 641 В.

Отсюда можно сделать вывод, что при полученном напряжении структура с нашими исходными данными, при учёте исключительно накопления заряда в базах, перейдет в состояние пробоя, так как паразитный транзистор перейдет в открытое состояние.

Напряжение, при котором произойдет защелкивание структуры исключительно благодаря лавинному размножению носителей заряда можно примерно оценить с помощью графика зависимости пробивного напряжения от концентрации примеси в базе. График представлен на рисунке 2.

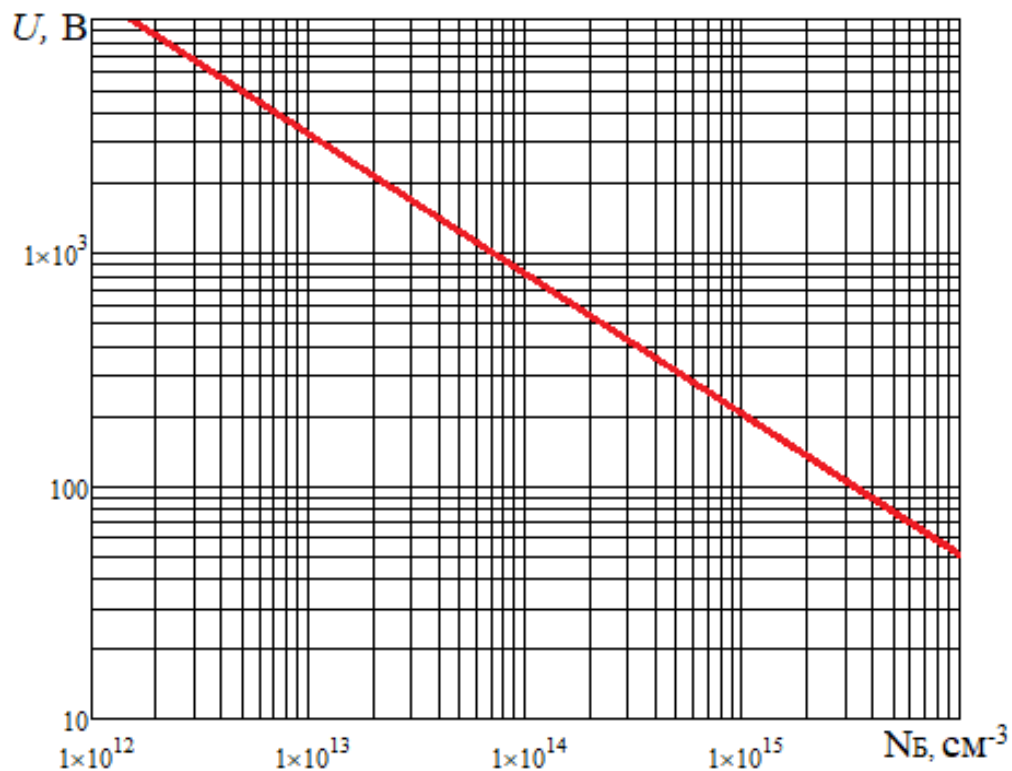


Рисунок 2.2 – Зависимость пробивного напряжения при лавинном пробое от концентрации примеси в базе

По данному графику видно, что при выбранном нами значении концентрации примеси напряжение, при котором произойдет защелкивание структуры исключительно благодаря лавинному размножению носителей, превышает 1000 В. Следовательно, в нашем случае им можно пренебречь, так накопление заряда в базах произойдет значительно раньше.

3 Моделирование тиристорной структуры в закрытом состоянии при обратном включении

Обратное блокирующее состояние тиристора наступает при отрицательном потенциале анода по отношению к катоду. В нашем случае это при отрицательном потенциале эмиттера по отношению к катоду. Второй эмиттерный и коллекторный переходы оказываются обратносмещенными. Так как область $\mathcal{E}_2$ является сильнолегированной и поэтому второй эмиттерный переходит до наступления пробоя выдержит только небольшое обратное напряжение. В связи с этим при высоком напряжении влиянием перехода $\mathcal{E}_2$ можно пренебречь. Отсюда можно сделать вывод, что при обратном напряжении тиристор напоминает транзистор с разомкнутой базой. Моделирование в таком случае возможно с учётом этого условия. Если не учитывать влияние эмиттера $\mathcal{E}_2$ на обратное блокирующее напряжение, что справедливо для низких приложенных напряжений, когда ширина слоя пространственного заряда перехода E_1 в p -базе мала по сравнению с общей шириной n -базы, то тиристор ведет себя аналогично диоду при обратном смещении. В этом случае ток утечки:

$$I_{\text{ут}} = q \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \left(\frac{n_i^2}{N_D} \right) + \frac{qn_i(x_n + x_p)}{2\tau_{se}} \quad (3.1)$$

где D_p – коэффициент диффузии дырок; τ_p – время жизни неосновных носителей заряда при низком уровне инжекции в n -базе; N_D – концентрация доноров; $(x_n + x_p)$ – ширина области пространственного заряда; τ_{se} – время жизни в области пространственного заряда.

Первое слагаемое уравнения – диффузионная компонента тока, а второе является генерационным током, который в кремнии доминирующий. Данный ток имеет зависимость от температуры и обычно называется тепловым генерационным током утечки. Если пренебрегать влиянием второго эмиттера (при этом тиристор продолжает вести себя как диод).

Если в полупроводнике есть избыток носителей обусловленных, к примеру, тепловой генерацией или инжекцией, то предполагается что эти процессы при тепловом равновесии компенсируются процессами рекомбинации. Рекомбинация дырок и электронов может происходить через ловушки захвата, глубокие примесные уровни и переходы зона-зона. Такая рекомбинация характеризуется временем жизни, которое в первом приближении определяется отношением избытка плотности заряда неосновных носителей к скорости рекомбинации G . К примеру, для дырок в кремнии n -типа время жизни неосновных носителей заряда — это отношение средней плотности инжектированных дырок к скорости рекомбинации.

Время жизни неосновных носителей заряда для ловушек плотностью N_t с одним уровнем E_t в запрещенной зоне кремния:

$$\tau_p = \tau_{p0} \left[1 + \frac{1}{1 + h_0} \exp\left(\frac{E_t - E_f}{kT}\right) \right] + \tau_{n0} \left[\frac{h_0}{1 + h_0} + \frac{1}{1 + h_0} \exp\left(\frac{E_i - E_t}{kT} + \frac{E_i - E_f}{kT}\right) \right] \quad (3.2)$$

где: E_f — уровень Ферми; $E_i = (E_c - E_v)/2$ — собственный уровень; $h_0 = n/n_0$, где n — средняя плотность инжектированных электронов; n_0 — равновесная плотность электронов.

Собственные времена жизни дырок и электронов:

$$\tau_{p0} = \frac{1}{\sigma_p v_s N_t} \quad (3.3)$$

$$\tau_{n0} = \frac{1}{\sigma_n v_s N_t} \quad (3.4)$$

здесь: σ_p, σ_n — сечения захвата дырок и электронов уровнями ловушек; v_s — тепловая скорость носителей; N_t — плотность ловушек.

Время жизни в области пространственного заряда:

$$\tau_{se} = \left[\exp\left(\frac{E_f - E_t}{kT}\right) + b_0 \exp\left(\frac{E_f - E_i}{kT}\right) \right] \quad (3.5)$$

Первый член в правой части уравнения для тока утечки это диффузионная компонента тока. Второй член — генерационный ток, который в

нашем случае является доминирующей компонентой. Данный ток имеет зависимость от температуры и обычно называется тепловым генерационным током утечки. При предположении, что тиристорная структура продолжает вести себя как диод ток может стремительно возрасти вследствие лавинного пробоя перехода $\mathcal{E}_1$.

Если же слой пространственного заряда перекроет базу раньше, чем достигается напряжение пробоя, то произойдет смыкание слоя с переходом K и наступит пробой при напряжении смыкания.

$$U_{\text{см}} = \frac{qN_D W_N^2}{2\varepsilon_s} \quad (3.6)$$

где W_N – ширина базы; ε_s – диэлектрическая проницаемость.

Так как тиристорная структура при обратном смещении имеет характеристики, аналогичные транзистору, напряжение пробоя лежит между значениями напряжения лавинного пробоя и напряжения смыкания ОПЗ.

Если рассматривать структуру как транзистор с общим эмиттером и разомкнутой базой, ток утечки можно оценивать по формуле:

$$I_{\text{ут}2} = \frac{MI_{\text{ут}}}{1 - \alpha_{npn}} \quad (3.7)$$

где $I_{\text{ут}}$ – указанная выше сумма генерационного тока ОПЗ и диффузионного тока; α_{npn} – общий коэффициент усиления транзистора NPN ; M – коэффициент умножения коллекторного перехода.

Коэффициент умножения определяет эффекты лавинного умножения и отношения тока входящего в область лавины и вытекающего из нее. По уравнению выше можно сделать вывод, что при $M = 1/\alpha_{npn}$ ток ограничивается только внешней нагрузкой и происходит пробой.

Выражение, связывающее коэффициент умножения с приложенным напряжением:

$$M = \frac{1}{1 - (V/V_B)^{n_B}} \quad (3.8)$$

Отсюда обратное напряжение пробоя тиристорной структуры:

$$29 \quad (3.9)$$

$$U_{об} = U_k(1 - \alpha_{npn})^{n_B}$$

где n_B – коэффициент, изменяющийся в диапазоне от 4 до 10 при различных значениях напряжения пробоя; U_k – напряжение пробоя коллекторного перехода.

Для определения напряжения пробоя тиристорной структуры необходимо найти напряжение пробоя коллекторного перехода и общий коэффициент передачи транзистора NPN :

1. Напряжение пробоя коллекторного перехода.

Для простоты понимания и дальнейшего использования были введены определенные обозначения областей и p - n -переходов:

1. Область эмиттера ($\mathcal{E}_1$) – область со стороны изолированного электрода.
2. Область базы ($\mathcal{B}_1$) – область, где образуется проводящий канал.
3. Область базы ($\mathcal{B}_2$).
4. Область эмиттера ($\mathcal{E}_2$) – область со стороны вывода коллектора.
5. E_1 – первый эмиттерный переход.
6. K – коллекторный переход.
7. E_2 – второй эмиттерный переход.

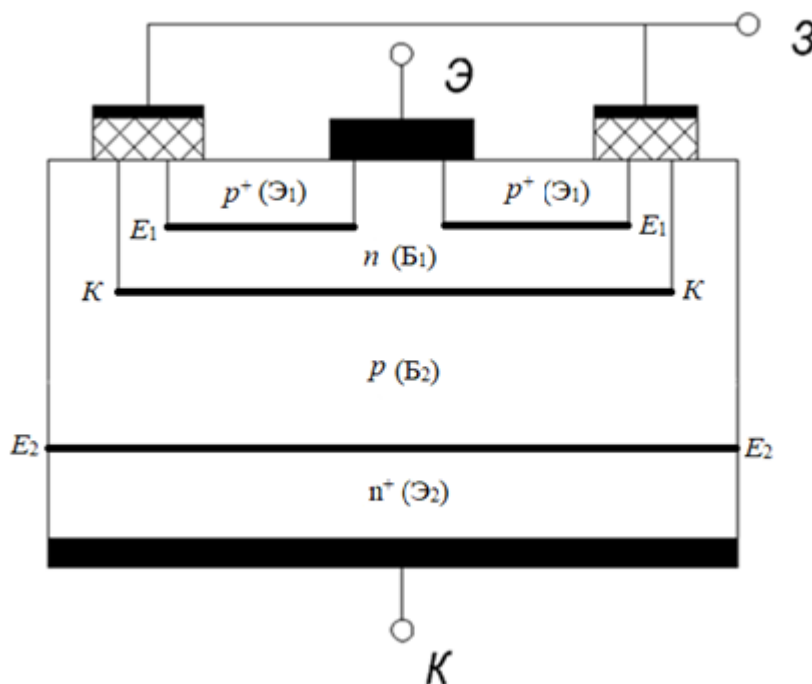


Рисунок 2.3 – Структура БТИЗ

Коллекторный переход является плавным. Напряжение пробоя плавного p - n -перехода можно определить с помощью графика зависимости напряжения пробоя от градиента концентрации (рисунок 2.4):

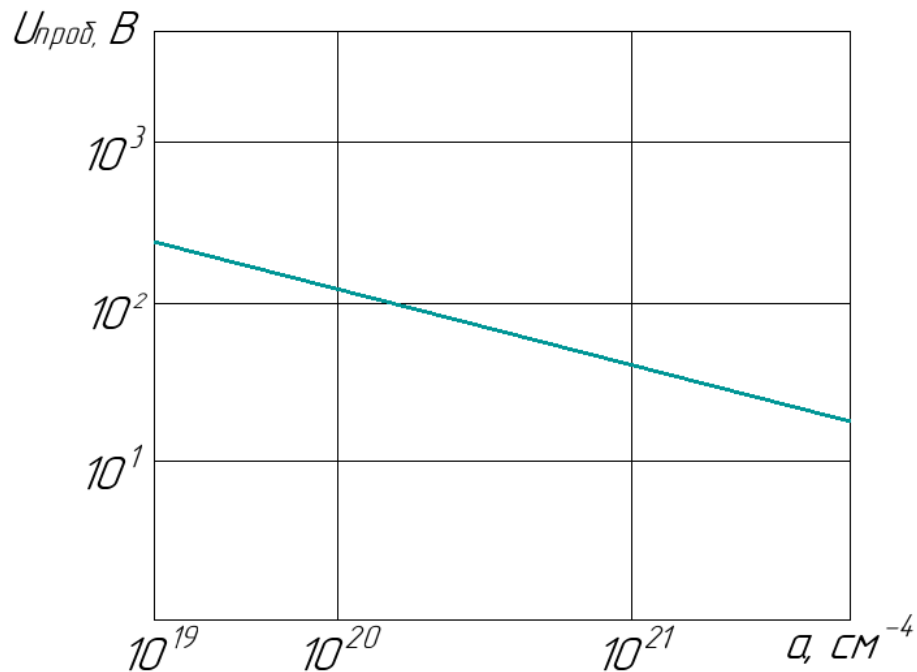


Рисунок 2.4 – Зависимость напряжения при лавинном пробое от градиента концентрации примесей в p - n -переходе

Градиент концентрации взят 10^{19} см^{-4} . Следовательно, напряжение пробоя коллекторного перехода $\approx 300 \text{ В}$.

2. Общий коэффициент усиления транзистора N - P - N :

Необходимо ввести исходные данные: концентрация основных носителей в эмиттерной области: $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$; концентрация основных носителей в базовой и коллекторной областях: $3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$.

Концентрации неосновных носителей найдены с помощью закона действующих масс:

$$n_{p0э} = \frac{n_i^2}{N_{P1}} = 1,33 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-3} \quad (3.10)$$

$$p_{n0б} = \frac{n_i^2}{N_{N1}} = 4 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3} \quad (3.11)$$

Подвижность определена с помощью графика зависимости от концентрации носителей заряда: $\mu_N = 1300 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$; $\mu_P = 500 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

Коэффициент диффузии:

$$D_P = \frac{\mu_P kT}{q} = 3,25 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^2}{\text{с}} \quad (3.12)$$

$$D_N = \frac{\mu_N kT}{q} = 1,5 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^2}{\text{с}} \quad (3.13)$$

Диффузионная длина:

$$L_{N1} = \sqrt{D_{N1} \cdot \tau_{N1}} = 6,708 \cdot 10^{-5} \text{м} \quad (3.14)$$

$$L_{P1} = \sqrt{D_{P1} \cdot \tau_{P1}} = 3,122 \cdot 10^{-5} \text{м} \quad (3.15)$$

Коэффициент передачи транзистора найден по формуле:

$$\alpha_{npn} = \gamma \alpha_{\Pi} \alpha^* M(U) \quad (3.16)$$

γ – эффективность эмиттера, показывающая долю инжектированных в базу носителей заряда в общем токе эмиттера.

$$\gamma \approx 1 - \frac{n_{p03} D_n w}{p_{n06} D_p L_n} = 0.976 \quad (3.17)$$

α_{Π} – коэффициент переноса, показывающий, какая часть инжектированных в базу носителей заряда доходит до коллекторного перехода.

$$\alpha_{\Pi} \approx 1 - \frac{w^2}{2L_p} = 0.434 \quad (3.18)$$

α^* – эффективность коллектора, показывающая, во сколько раз ток коллектора возрастает из-за наличия в обратном токе коллекторного перехода составляющей, зависящей от тока эмиттера. Обычно это значение принимают равным единице.

M – коэффициент лавинного размножения.

$$M(U) = \frac{1}{1 - (U/U_{\text{проб}})^b}, \quad (3.19)$$

где b – коэффициент, различный для разных материалов ($b = 2 \dots 6$).

В нашем случае коэффициент лавинного размножения можно принять равным единице.

Используя рассчитанные выше значения коэффициента передачи:

$$\alpha_{npn} = \gamma \alpha_{\Pi} \alpha^* M(U) = 0,424$$

Отсюда обратное напряжение пробоя тиристорной структуры:

$$U_{об} = U_k(1 - \alpha_{npn})^{n_B} = 300(1 - |-0,424|)^4 = 261 \text{ В}$$

Описанный выше алгоритм позволяет рассчитать напряжение пробоя тиристорной структуры биполярного транзистора с изолированным затвором при обратном включении.

4 Проектирование тиристорной основы

4.1 Выбор полупроводникового материала

Исходной точкой в процессе разработки БТИЗ является выбор исходного материала, а именно самого полупроводника. В качестве материала, используемого в настоящее время для создания мощных устройств, служит кремний. Более конкретно – очищенный зонной плавкой и легированный фосфором кремний *n*-типа. В некоторых случаях применяется также эпитаксиальный кремний. Стоит изучить причины, приведшие к такому выбору материала. Существуют три типа полупроводниковых материалов, которые используются для производства мощных БТИЗ: кремний, германий и арсенид галлия. Материал должен удовлетворять следующим основным требованиям:

1. Обеспечение достаточной глубины залегания диффузионных переходов. Они должны выдержать высокое блокирующее напряжение.
2. Полупроводниковый материал должен обладать равномерным распределением донорной примеси и совершенной кристаллической структурой.
3. Для достижения высоких значений блокирующего напряжения необходимо обеспечить низкую концентрацию примесей.
4. Материал должен выдерживать высокую температуру и иметь большую теплопроводность.
5. Время жизни неосновных носителей должно быть достаточно высоким для обеспечения низкого значения напряжения открытия тиристорной структуры.

Явными преимуществами среди других материалов обладает арсенид галлия. Высокая подвижность, температура плавления, большая ширина запрещенной зоны, позволяющая работать при высокой температуре. Высокая подвижность электронов обуславливает низкое сопротивление прибора во включенном состоянии. Малое время жизни неосновных носителей обеспечивает быстрое переключение и высокое напряжение пробоя.

Главными недостатками являются сложная технология изготовления и высокая стоимость приборов на его основе.

Другим полупроводником с большой подвижностью носителей является германий, но его применение ограничено из-за высокой собственной концентрации носителей и малой ширины запрещенной зоны. Малая ширина запрещенной зоны приводит к большой утечке тока при повышении температуры, а собственная концентрация носителей ограничивает напряжение лавинного пробоя. Низкая температура плавления не позволяет получить переходы с большой глубиной диффузионного слоя. В германии легко формируется сплавной *p-n*-переход, который неприемлем в нашем случае.

Кремний – полупроводник с высокой температурой плавления, низкой собственной концентрацией носителей, умеренно широкой запрещенной зоной и высоким временем жизни носителей заряда. Подвижность носителей в кремнии уступает по абсолютному значению как германию, так и арсениду галлия, что приводит к большему падению напряжения во включенном состоянии. Но это адекватно компенсируется большим временем жизни неосновных носителей и хорошими термическими свойствами материала. Кроме перечисленных преимуществ кремния существует современная промышленная технология его изготовления и возможность введения фосфора методом нейтронной трансмутации.

4.2 База p -типа

Для обеспечения высокого напряжения пробоя свыше 1000 В необходимо слои $P1$ и $P2$, которые формируют прямой и обратный блокирующие переходы Э1 и Э2 соответственно, создавать путем диффузии.

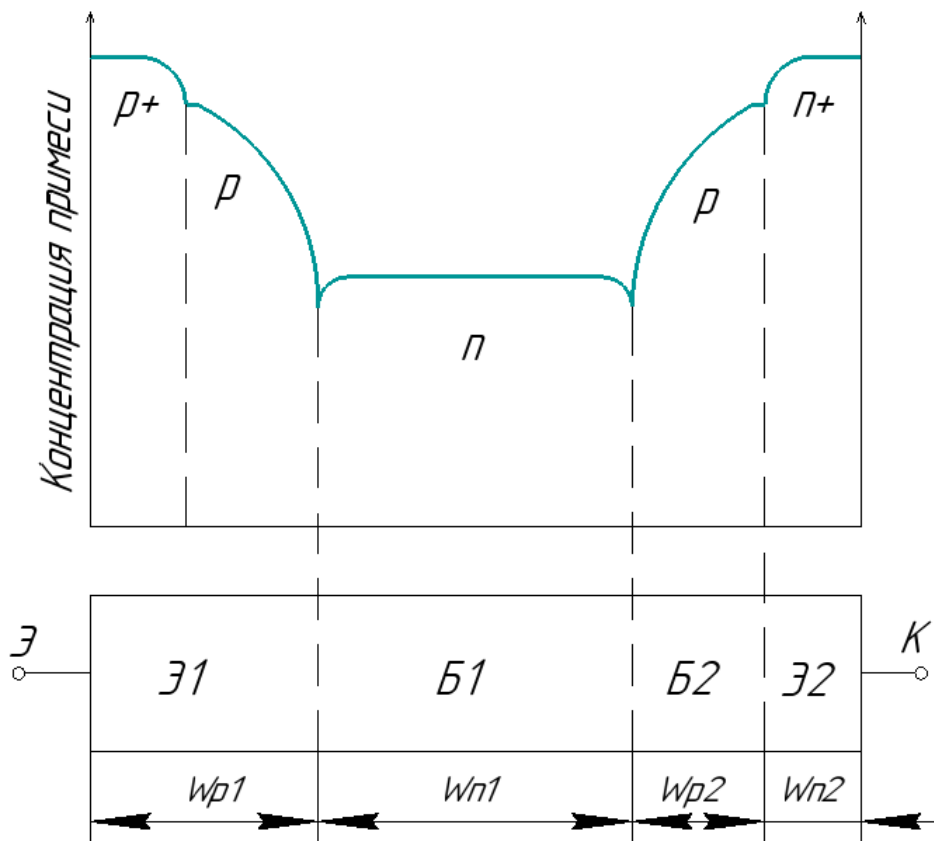


Рисунок 4.1 – Концентрационный профиль тиристорной структуры
Ширина слоев определяется выражением:

$$W_{P1} = W_{P2} + W_{N2} \quad (4.1)$$

Данное значение изменяется в интервале от 30 до 140 мкм в зависимости от необходимого рабочего напряжения. Стоит учитывать, что при увеличении толщины базы уменьшается быстродействие. На данном этапе примем значение толщины p -базы 50 мкм.

Существуют три легирующие акцепторные примеси, которые обычно используются для создания этих слоёв: галлий, алюминий и бор. Бор применяется при локальной диффузии акцепторов, например, для создания охранных колец в планарных структурах. К сожалению, бор является медленно диффундирующей примесью по сравнению с галлием и алюминием. Он также

создает нарушения в кристаллической решетке кремния, в результате которых могут возникнуть большие тепловые токи утечки.

С другой стороны, как галлий, так и алюминий являются быстродиффундирующими элементами и не вносят структурных нарушений в кристаллическую решетку кремния, но в отличие от бора они не могут использоваться для создания рисунка по фотошаблону с применением двуокиси кремния в качестве маскирующего средства.

Распределение легирующих примесей в слоях, полученных диффузией, описывается следующими уравнениями. Если источник легирующей примеси является неограниченным, то распределение характеризуется функцией ошибок:

$$N(x, t) = N_0 \operatorname{erfc} \left(\frac{-x}{2\sqrt{Dt}} \right) - N_B \quad (4.2)$$

А если источник диффузии является ограниченным, то оно описывается функцией Гаусса:

$$N(x, t) = N_0 \exp \left(\frac{-x^2}{4Dt} \right) - N_B \quad (4.3)$$

Здесь $N(x, t)$ – концентрация примеси в некоторой точке x для времени диффузии t ; N_0 – поверхностная концентрация примеси; D – коэффициент диффузии; N_B – концентрация примеси в исходном материале.

Значения коэффициентов диффузии примесей, используемых в производстве высоковольтных силовых приборов приведены на рисунке 4.1. С их учетом рассчитываются распределения примесей при диффузионных процессах.

Одним из самых критичных параметров при проектировании тиристорной структуры является поперечное сопротивление p -базы. Оно влияет как на ток управления, так и на стойкость тиристора к эффекту dv/dt .

Поперечное сопротивление p -базы:

$$\rho_s = \frac{\text{усредненное удельное сопротивление } p - \text{базы}}{\text{ширина } p - \text{базы}}$$

Усредненное удельное сопротивление лучше всего рассчитывать используя численное интегрирование удельного сопротивления между переходами E_1 и E_2 . Как альтернативу, можно использовать кривые Ирвина [7], которые дают приближенное значение поперечного сопротивления.

Концентрация легирующей примеси в p -базе и ширина p -базы определяют эффективность инжекции n -эмиттера. Поскольку высокий коэффициент инжекции иметь предпочтительнее для того, чтобы добиться минимального напряжения в тиристорной структуре в открытом состоянии, любые поиски оптимального решения заключаются в обеспечении минимума концентрации легирующей примеси в p -базе.

Ограничение накладывается также на ширину p -базы, от значения которой зависит напряжение пробоя тиристорной структуры. В закрытом состоянии слой пространственного заряда распространяется на обе стороны перехода К. Если при расширении слой пространственного заряда в слое B_2 достигает эмиттерного перехода E_2 , то происходит преждевременный пробой.

Для диффузионного перехода ширина слоя пространственного заряда может быть рассчитана из численного решения одномерного уравнения Пуассона для диффузионного распределения примеси:

$$\frac{d^2V}{dx^2} = \frac{q}{\varepsilon_s} \rho(x) \quad (4.4)$$

где V – потенциал; $\rho(x)$ – концентрация заряда в слое пространственного заряда; ε_s – диэлектрическая проницаемость кремния.

В настоящее время невозможно сформулировать точное уравнение распределения примеси в p -базе. С учётом факторов, рассмотренных выше, а именно: поперечного сопротивления p -базы, ограниченных возможностей выбора диффузанта и ширины смыкания p -базы, тем не менее существует большое количество возможных вариантов.

При проектировании p -базы перед нами стоит задача определить оптимальную концентрацию носителей, которая будет обеспечивать минимальный коэффициент инжекции со стороны эмиттера и, при этом,

поддержание заданного рабочего напряжения. Необходимо обеспечить требуемое напряжение пробоя.

Для примера возьмем $U_{пр} = 600 \text{ В}$.

Для получения зависимости коэффициента инжекции от концентрации примеси в базе использована формула:

$$\alpha_{npn}(N_p) = \gamma(N_p) \alpha_{\Pi} \alpha^* \quad (4.5)$$

где $\gamma(N_p)$ – эффективность эмиттера, показывающая долю инжектированных в базу носителей заряда в общем токе эмиттера.

$$\gamma(N_p) \approx 1 - \frac{n_{p0э}(N_p) D_n W_B}{p_{n0б} D_p L_n} \quad (4.6)$$

α_{Π} – коэффициент переноса, показывающий, какая часть инжектированных в базу носителей заряда доходит до коллекторного перехода.

$$\alpha_{\Pi} \approx 1 - \frac{W_B^2}{2L_p} \quad (4.7)$$

α^* – эффективность коллектора, показывающая, во сколько раз ток коллектора возрастает из-за наличия в обратном токе коллекторного перехода составляющей, зависящей от тока эмиттера. Обычно это значение принимают равным единице.

Концентрации неосновных носителей найдены с помощью закона действующих масс:

$$n_{p0э}(N_p) = \frac{n_i^2}{N_p} \quad (4.8)$$

$$p_{n0б} = \frac{n_i^2}{N_N} = 4 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3} \quad (4.9)$$

Подвижность определена с помощью графика зависимости от концентрации носителей заряда: $\mu_N = 1300 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$; $\mu_P = 500 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

Коэффициент диффузии:

$$D_P = \frac{\mu_P kT}{q} = 3,25 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^{-3}}{\text{с}} \quad (4.10)$$

$$(4.11)$$

$$D_N = \frac{\mu_N kT}{q} = 1,5 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^{-3}}{\text{с}}$$

Диффузионная длина:

$$L_{N1} = \sqrt{D_{N1} \cdot \tau_{N1}} = 6,708 \cdot 10^{-5} \text{м} \quad (4.12)$$

$$L_{P1} = \sqrt{D_{P1} \cdot \tau_{P1}} = 3,122 \cdot 10^{-5} \text{м} \quad (4.13)$$

Используя формулу (4.5), была получена зависимость коэффициента передачи от концентрации примеси.

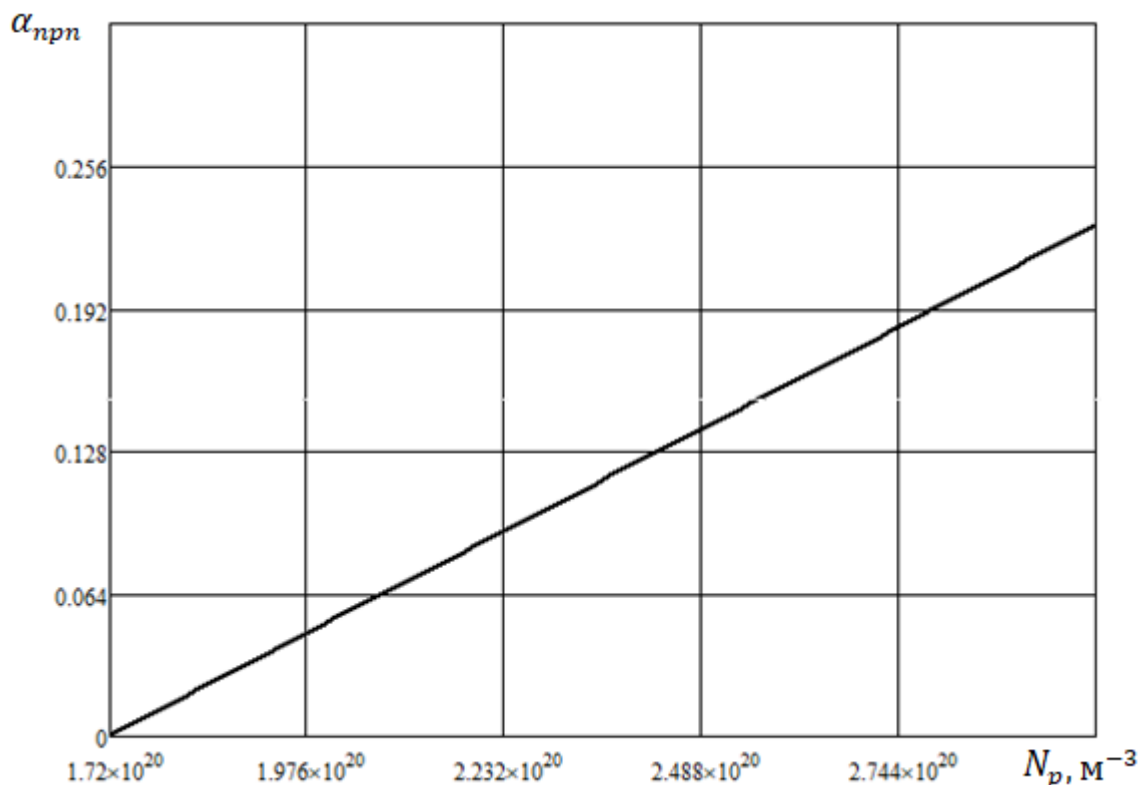


Рисунок 4.2 – Зависимость коэффициента передачи от концентрации примеси в базе

По графику видно, что ближайшая к нулю концентрация примеси примерно равна $1,72 \cdot 10^{-14} \text{см}^{-3}$.

Теперь, зная концентрацию примеси в базе, необходимо оценить возможность пробоя. Главным оценочным параметром пробоя при проектировании базы является напряжение смыкания. Это напряжение, при котором происходит смыкание областей объемного заряда. Оно определяется по формуле:

$$40 \quad (4.14)$$

$$U_{\text{см}} = \frac{qN_p W_p^2}{2\varepsilon\varepsilon_0}$$

$$U_{\text{см}} = \frac{1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 1.72 \cdot 10^{20} (65 \cdot 10^{-6})^2}{2 \cdot 12 \cdot 8.84 \cdot 10^{-12}} = 615 \text{ В}$$

Полученное напряжение смыкания не подходит, так как заданное рабочее напряжения транзистора – 600 В. Следовательно, необходимо либо увеличить толщину базы, либо концентрацию примеси. Оба этих изменения влекут за собой увеличение коэффициента инжекции.

4.3 База n -типа

Выбор правильного соотношения между удельным сопротивлением и толщиной n -базы для тиристорной структуры основывается на требуемых напряжениях пробоя его прямого и обратного переходов. Главное ограничение максимальных размеров толщины базы задается из напряжения прибора в открытом состоянии, которое пропорционально корню квадратному из толщины n -базы.

С целью обеспечения низких потерь в структуре толщина n -базы поддерживается максимально необходимой для того, чтобы получить определенное напряжение пробоя. Основное уравнение, которое дает простое аналитическое приближение для решения этой проблемы уже было использовано выше (3.9).

Если для аппроксимации коэффициента переноса воспользоваться уравнением (4.15) и считать коэффициент инжекции перехода E_1 равным единице, то максимальное обратное напряжение тиристора определяется по формуле (4.16).

$$\alpha_r = \frac{1}{\cosh(W_{B1} - x_n) / L_p} \quad (4.15)$$

где x_n – область пространственного заряда в области n -типа; W_{B1} – толщина базы; L_p – диффузионная длина дырок.

$$V_R = V_B \left(\frac{W_{B1} - x_n}{\sqrt{2}L_p} \right)^{2/n_B} \quad (4.16)$$

где V_B – напряжение пробоя; n_B – коэффициент пробоя.

Чтобы получить решение необходимо знать точную зависимость между удельным сопротивлением n -базы и напряжением лавинного пробоя диффузионного перехода.

Зависимость напряжения пробоя от удельного сопротивления n -базы показана на рисунке 4.3. К сожалению, хотя значение удельного сопротивления с некоторой точностью может быть определено по графику, то на практике имеем дело с теми допусками, с которыми контролируется удельное сопротивление при производстве кремния. Это накладывает ограничения на проектирование структуры, которое должно ориентироваться на наихудшую ситуацию, когда удельное сопротивление находится в нижнем конце допуска.

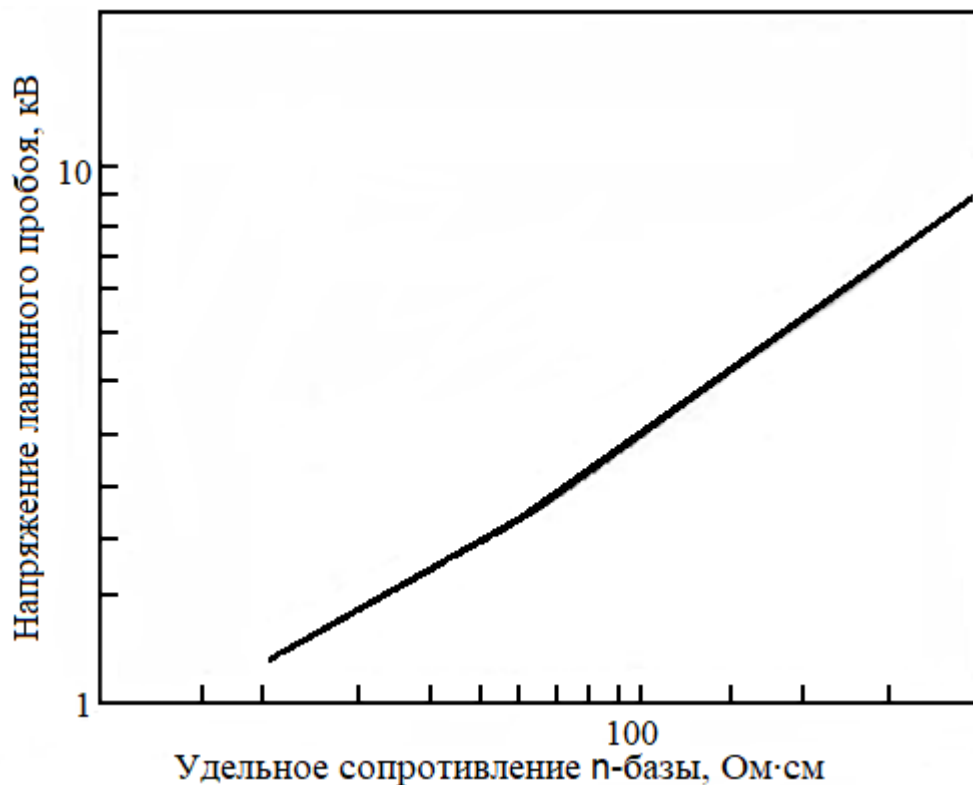


Рисунок 4.3 – Зависимость напряжения пробоя глубоких диффузионных p - n -переходов от удельного сопротивления n -базы

Влияние этого ограничения проверено в (Platzoder, Loch, 1976)[8]. При допустимом отклонении удельного сопротивления, равном $\pm\Delta\rho$, результирующее допустимое отклонение напряжения пробоя структуры при комнатной температуре:

$$\Delta V_B = \pm 0.75 V_B (\Delta \rho / \rho) \quad (4.17)$$

где V_B – напряжение пробоя.

При максимальной температуре перехода:

$$\Delta V_B = \pm 0.75 V_B (\Delta \rho / \rho) \quad (4.18)$$

Приведенные уравнения дают необходимую информацию о толщине и удельном сопротивлении n -базы для требуемого обратного напряжения пробоя. По рассчитанной толщине n -базы структуры толщина кремниевой пластины может быть определена путём сложения всех диффузионных слоев p -типа.

Однако следует подчеркнуть, что рассмотренная методика проектирования основывается на определении значения напряжения обратного пробоя без учёта влияния поверхности перехода и условия возникновения прямого пробоя. На практике обычно учитывается, что будет достигнута лишь часть значения напряжения объемного пробоя, которая определяется по методике, используемой отдельно для каждого конкретного контура поверхности.

При проектировании структуры стоит учитывать ток утечки, так как при высокой температуре необходимо ограничивать прямой и обратный токи с целью уменьшить выделение тепла и гарантировать стабильность работы прибора. Ток утечки трудно предсказать с необходимой точностью, поскольку этот параметр в значительной степени определяется локальными неоднородностями в кремнии.

Задача при проектировании n -базы – нахождение концентрации примеси и толщины области при которых не происходит смыкание областей объемного заряда.

Для начала примем некоторое значение толщины базы. Возьмём 70 мкм.

Далее, зная толщину базы, можно определить подходящую концентрацию примеси, при которой будет обеспечен минимальный коэффициент передачи эмиттера.

Концентрации неосновных носителей найдены с помощью закона действующих масс:

$$n_{p0э} = \frac{n_i^2}{N_p} = 4 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3} \quad (4.19)$$

$$p_{n0б}(N_N) = \frac{n_i^2}{N_N} \quad (4.20)$$

Подвижность определена с помощью графика зависимости от концентрации носителей заряда: $\mu_N = 1300 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$; $\mu_p = 500 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

Коэффициент диффузии:

$$D_p = \frac{\mu_p kT}{q} = 3,25 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^{-3}}{\text{с}} \quad (4.21)$$

$$D_N = \frac{\mu_N kT}{q} = 1,5 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^{-3}}{\text{с}} \quad (4.22)$$

Диффузионная длина:

$$L_{N1} = \sqrt{D_{N1} \cdot \tau_{N1}} = 6,708 \cdot 10^{-5} \text{ м} \quad (4.23)$$

$$L_{P1} = \sqrt{D_{P1} \cdot \tau_{P1}} = 3,122 \cdot 10^{-5} \text{ м} \quad (4.24)$$

Для получения зависимости коэффициента инжекции от концентрации примеси в базе использована формула:

$$\alpha_{np}(N_N) = \gamma(N_N) \alpha_{\Pi} \alpha^* \quad (4.25)$$

где $\gamma(N_p)$ – эффективность эмиттера, показывающая долю инжектированных в базу носителей заряда в общем токе эмиттера.

$$\gamma(N_N) \approx 1 - \frac{n_{p0э} D_n W_B}{p_{n0б}(N_N) D_p L_n} \quad (4.26)$$

α_{Π} – коэффициент переноса, показывающий, какая часть инжектированных в базу носителей заряда доходит до коллекторного перехода.

$$\alpha_{\Pi} \approx 1 - \frac{W_B^2}{2L_p} \quad (4.27)$$

α^* - эффективность коллектора, показывающая, во сколько раз

ток коллектора возрастает из-за наличия в обратном токе коллекторного перехода составляющей, зависящей от тока эмиттера. Обычно это значение принимают равным единице.

Используя формулу (4.25), была получена зависимость коэффициента передачи от концентрации примеси.

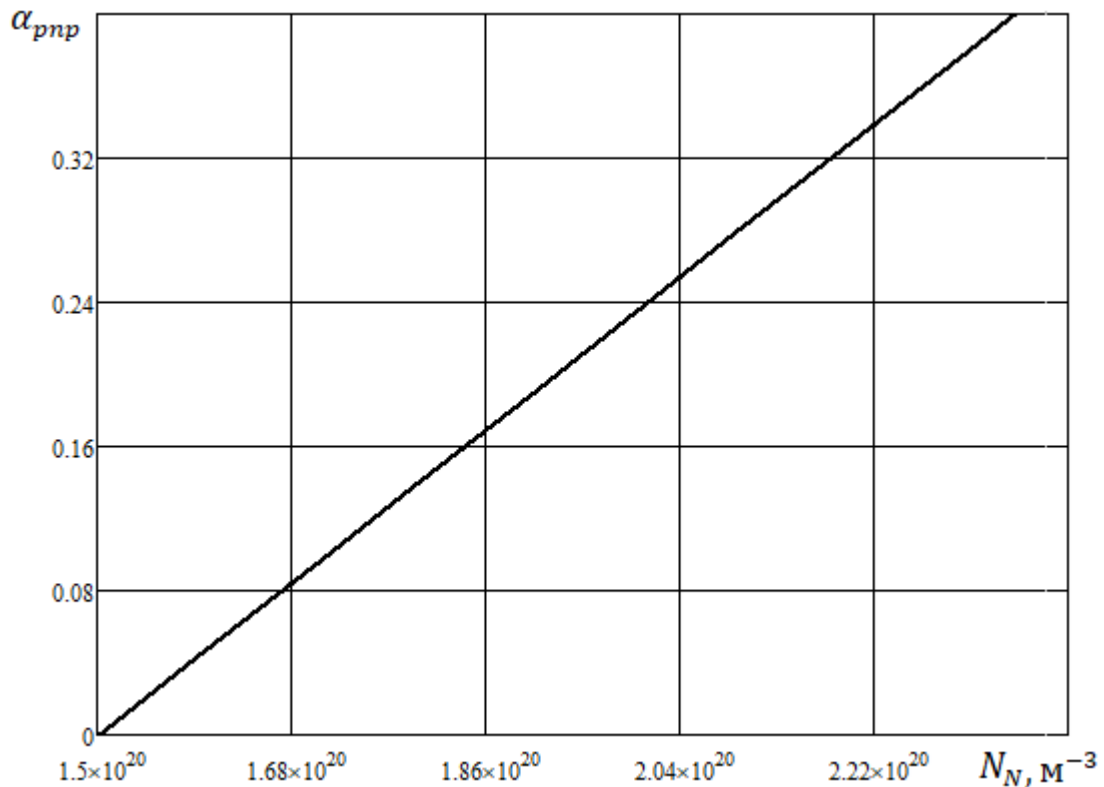


Рисунок 3.2.2 – Зависимость коэффициента передачи от концентрации примеси в базе

По графику видно, что ближайшая к нулю концентрация примеси примерно равна $1.5 \cdot 10^{-14} \text{ см}^{-3}$.

Для определения напряжения смыкания воспользуемся формулой:

$$U_{\text{см}} = \frac{q N_K W_n^2}{2 \varepsilon \varepsilon_0} \quad (4.28)$$

$$U_{\text{см}} = \frac{1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 2.4 \cdot 10^{20} (70 \cdot 10^{-6})^2}{2 \cdot 12 \cdot 8.84 \cdot 10^{-12}} = 902 \text{ В}$$

Полученного напряжения смыкания в нашем случае вполне достаточно. Следовательно, толщина области выбрана подходящая.

4.4 Эмиттеры p - и n -типа

Эмиттерные области характеризуются коэффициентами инжекции эмиттеров двух составных транзисторов и плотностью избыточных носителей в базовых областях. Оба эмиттера обычно являются диффузионными слоями. P -база и p -эмиттер формируются обычно в процессе одной диффузионной операции.

Коэффициенты инжекции могут быть представлены соответственно для p - и n -эмиттера в виде:

$$\gamma_P = \left(1 + \frac{N_{N1}W_{N1}}{N_{N1}L_{P1}}\right)^{-1} \quad (4.29)$$

$$\gamma_N = \left(1 + \frac{N_{P2}W_{P2}}{N_{N2}L_{N2}}\right)^{-1} \quad (4.30)$$

где N_{N1} , N_{P1} , N_{P2} и N_{N2} – средние равновесные плотности основных носителей в слоях N_1 , P_1 , P_2 , N_2 ; W_{N1} и W_{P2} – ширина базовых областей; L_{P1} и L_{N2} – диффузионные длины неосновных носителей заряда в эмиттерах.

Коэффициенты инжекции обоих эмиттером должны быть минимальны для обеспечения минимальный избыточный заряд и, следовательно, высокое пробойное напряжение. Это реализуется при небольших диффузионных длинах и высокой величине отношений N_{N1}/N_{P1} и N_{P2}/N_{N2} .

Для p -эмиттера диффузия часто проводится при низких концентрациях легирующей примеси. В этом случае получается мелкий концентрационный профиль, обеспечивающий высокое напряжение пробоя.

5 Анализ условий зрительной работы при работе с ПЭВМ

Большую часть окружающей нас информации воспринимается с помощью органов зрения. В связи с этим очень важно сохранить здоровое зрение в течении всей жизни. Правильное использование света дает возможность уменьшить травматизм и сохранить здоровье людей.

В настоящее время очень много людей проводит основную часть своей работы за компьютерами. Очень важно обеспечить сотруднику комфортные условия труда, при которых нагрузка на глаза будет минимальной.

Различают несколько видов освещения в зависимости от типа источника света – естественное, искусственное и совмещенное. Естественное создается солнцем и диффузным светом небесного излучения. Искусственное осуществляется электрическими лампами накаливания и газоразрядными источниками света – люминесцентными лампами, ртутными лампами высокого давления, металлогалогенными лампами общего назначения, натриевыми, ксеноновыми и др. Совмещенное обеспечивается совместно естественным и искусственным освещением.

Цель анализа – определить необходимое значение освещенности при работе с ПЭВ в помещении с искусственным освещением.

Документом, регламентирующим производственное освещение, являются строительные нормы и правила СНиП 23-05- 95 [9].

Согласно этим нормам для искусственного освещения установлены значения минимальной освещенности на рабочей поверхности в зависимости от следующих факторов:

1. Характеристики или разряд зрительной работы, зависящий от наименьших размеров объекта различения.

В случае работы с ПЭВМ наименьшим объектом различения является символ точки, чей размер составляет порядка миллиметра. Согласно

СНиП23-05- 95 характеристика зрительной работы - средней точности.

2. Контраст объекта различения с фоном (K), представляющий отношение абсолютной величины разности между яркостями объекта и фона к большей по значению яркости. Данный коэффициент можно выразить через коэффициенты отражения фона и объекта. В нашем случае фон имеет белый цвет, объект – чёрный. Значение коэффициента отражения для белого фона 0,9, для черного – 0,04.

$$K = \frac{\rho_0 - \rho_{\Phi}}{\rho_0} = \frac{0,9 - 0,04}{0,9} = 0,95 \quad (5.1)$$

Контраст объекта различения с фоном считается:

- большим при $K > 0,5$ (объект и фон резко отличаются по яркости);
- средним – при $0,2 \leq K \leq 0,5$ (объект и фон заметно отличаются по яркости);
- малым – при $K < 0,2$ (объект и фон мало отличаются по яркости) [9].

Получается, контраст объекта различения с фоном является большим.

3. Характеристика фона (степень светлости) зависит от величины коэффициента отражения. Фон считается светлым, если коэффициент отражения поверхности больше 0,4; средним – коэффициент отражения от 0,2 до 0,4; темным – коэффициент отражения менее 0,2 [9]. В нашем случае фон является светлым.

Отсюда можно сделать вывод: согласно СНиП 23-05-95 работа за ПЭВМ при искусственно освещении определяется как работа средней точности, IV разряд работы, подразряд Г. Освещенность на рабочем месте не должна быть меньше 200 лк.

При таком типе работы установлены некоторые нормированные значения, такие как:

1. Показатель ослеплённости - это изменение видимости или контрастной чувствительности при наличии блёстких источников в поле зрения [9];

2. Коэффициент пульсаций освещенности $K_{п}$ - характеризуется изменением светового потока разрядных источников света во времени с частотой 100 Гц при питании током промышленной частоты

Результаты анализа зрительной работы при работе с ПЭВМ представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Результаты анализа

Освещенность, лк		200
Подразряд зрительной работы		Г
Показатель ослепленности		40
Коэффициент пульсации освещенности, %		20
Контраст объекта различения с фоном		Большой
Характеристика фона	Степень светлости	Светлый
	Коэффициент отражения, ρ_f	0,9
	Наименование	Белый фон
Вид освещения		Искусственное
Характеристика зрительной работы СНиП 23-05-95		Средняя точность
Разряд работы		IV
Объект различения	Коэффициент отражения ρ_o	0,04
	Размер, мм	1
	наименование	Символ «точка»
Вид зрительной работы		ПЭВМ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения магистерской диссертации был произведен расчёт параметров и характеристик биполярного транзистора с изолированным затвором. В первом пункте работы было проведено сравнение структуры тиристора со структурой БТИЗ, в ходе которого был сделан вывод, что структура БТИЗ представляет собой обычный тиристор. Управление данным прибором осуществляется с помощью напряжения, а именно подачей напряжения на затвор. Вследствие этого образуется канал, через который дополнительные носители заряда попадают в базовую область. Принцип действия подзатворной области БТИЗ схоже с принципом действия полевого транзистора.

Произведено описание причин возникновения эффекта «защелкивания структуры». Данный эффект связан с открытием паразитного тиристора и при определенном напряжении приводит к пробое структуры. Его возникновение может происходить по трём причинам. Для случаев исключительно накопления носителей заряда в базах и лавинного размножения носителей заряда были получены значения пробойного напряжения. Комбинированный вариант, когда пробой происходит одновременно по двум причинам, является более сложным и может служить темой дальнейших исследований.

В дополнение к теме причин возникновения пробоя структуры было произведено моделирование тиристорной структуры БТИЗ при обратном включении. Составлен алгоритм расчёта напряжения пробоя.

Все решенные выше задачи являются «обратными». Зная концентрации примеси, были получены значения напряжений пробоя. В реальности при проектировании необходимо решить «прямую» задачу, а именно произвести подбор значений концентрации примеси, которые обеспечат заданное рабочее напряжение и, одновременно, напряжение пробоя.

Разработана методика позволяющая установить связь между параметрами структуры и появлением эффекта «защелкивания» структуры.

Были подобраны концентрация примеси и ширина базы, при которых полностью исключается тиристорный эффект. При этом обязательно происходит проверка на отсутствие вероятности смыкания областей объемного заряда.

Хотя полученные значения и гарантируют нулевой коэффициент передачи, они могут не устраивать с точки зрения, например, номинальной рассеиваемой мощности или быстродействия. При дальнейшей оптимизации необходимо рассчитывать параметры самого компонента и искать минимальные возможные значения, при которых коэффициент передачи не будет превышать значение единицы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Биполярный транзистор с изолированным затвором [Электронный ресурс]: Википедия. Свободная энциклопедия. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/БТИЗ> (дата обращения: 25.04.2021).
2. Афанасьев П.В. Полупроводниковые элементы силовых устройств [Текст] / П.В. Афанасьев // Электрик. – Киев, 2009. – 4 с.
3. Пасынков В.В., Чиркин Л.Л. Полупроводниковые приборы: Учебное пособие. 9-е изд., стер. – СПб.: Издательство «Лань», 2009. – 480 с.: ил. – (Учебники для вузов. Специальная литература).
4. Казначеев В.А., Шерстюк В.А. БЭК 16. Отечественные транзисторы БСИТ, СИТ, БТИЗ / В.А. Казначеев, В.А. Шерстюк // Додэка-XXI – М., 2010. – 63 с.
5. ГОСТ 19095-73. Транзисторы полевые. Термины, определения и буквенные обозначения параметров. – Введ. 1973-01-01. – М.: Госстандарт СССР: Изд-во стандартов, 1973. – 26 с.
6. ГОСТ 20859.1—89. Приборы полупроводниковые силовые. Общие технические требования. – Введ. 1990-01-01. – М.: Госстандарт СССР: Изд-во стандартов, 1990. – 29 с.
7. ГОСТ 20003-74. Транзисторы биполярные. Термины, определения и буквенные обозначения параметров. Введ. 1974-07-01. – М.: Госстандарт СССР: Изд-во стандартов, 1974. – 27 с.
8. Тейлор. П. Расчёт и проектирование тиристорных. Пер. с англ. – Ю.А. Евсеева – М.: Издательство «Энергоатомиздат», 1990. – 208 с.: ил. ISBN 5-283-02495-4.
9. СНиП 23-05-95. Естественное и искусственное освещение [Электронный ресурс]: Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/871001026> (дата обращения: 25.05.2021)

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(обязательное)
Лист задания на ВКР

«Утверждаю»

Заведующий кафедрой

 Пронин И.А.
(фамилия, имя, отчество)

«19» мая 2023 г.

З А Д А Н И Е

на выпускную квалификационную работу магистра

1. Студент гр. 21ПДм1 факультета информационных технологий и электроники
Направление 11.04.04 Электроника и нанoeлектроника
Магистерская программа Нано- и микроэлектроника
_____ Сидоровой Н.С.
(фамилия, имя, отчество)
2. Руководитель _____ Головяшкин А.Н.
(фамилия, имя, отчество)
3. Тема выпускной работы: Расчёт и моделирование параметров и характеристик биполярного транзистора с изолированным затвором
Тема утверждена приказом ПГУ № 360а/о от «04» апреля 2023 г.
4. Техническое задание на выпускную работу (разработать, исследовать (назначение объекта разработки, исследования), исходные данные, граничные условия разрабатываемого или исследуемого объекта, условия эксплуатации и т.д.)
Анализ причин возникновения эффекта «защелкивания» структуры. Расчёт предельных напряжений биполярного транзистора с изолированным затвором (БТИЗ). Моделирование структуры в открытом состоянии при обратном включении. Оценка необходимости изменения структуры для увеличения напряжения пробоя.
5. Объем и содержание основной части выпускной работы
 - 5.1. Пояснительная записка (перечень вопросов, подлежащих разработке, обоснований, описаний, расчетов и т.д.)
 - 1 Структура и принцип действия БТИЗ
 - 2 Эффект «защелкивания» структуры
 - 3 Моделирование тиристорной структуры в закрытом состоянии при обратном включении
 - 4 Проектирование тиристорной основы БТИЗ
 - 5 Анализ условий зрительной работы при работе с ПЭВМ
 - 5.2. Иллюстративная часть (перечень и содержание слайдов презентации)
 1. Цели ВКР (1 слайд)
 2. Структура БТИЗ (1 слайд)
 3. Эффект «защелкивания» структуры (1 слайд)
 4. Расчёт напряжения пробоя в случае накопления (2 слайд)

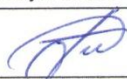
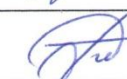
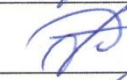
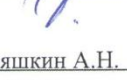
5. Расчёт напряжения пробоя в случае лавинного размножения	(1 слайд)
6. Моделирование при обратном включении	(2 слайда)
7. Проектирование тиристорной основы	(3 слайда)
8. Оценка необходимости изменения структуры	(1 слайд)
9. Основные выводы по результатам ВКР	(1 слайд)

Консультанты и содержание дополнительных разделов

6.1. _____

Консультант _____

7. Календарный график по выполнению выпускной работы магистра

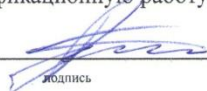
Наименование этапов работы	Объем работы	Срок выполнения	Подпись руководителя, консультанта
Исследование литературных источников. Анализ основных недостатков БТИЗ	20%	20.05	
Анализ причин возникновения эффекта «защелкивания» структуры. Расчёт предельных напряжений.	25%	23.05	
Моделирование тиристорной основы БТИЗ в закрытом состоянии при обратном включении	10%	24.05	
Проектирование тиристорной основы БТИЗ. Анализ необходимости изменения структуры	25%	27.05	
Анализ условий зрительной работы при работе с ПЭВМ	10%	30.05	
Оформление пояснительной записки ВКР	5%	1.06	
Оформление иллюстративной части ВКР	5%	1.06	

Руководитель выпускной работы  Головяшкин А.Н.
подпись фамилия, инициалы

Дата выдачи задания «19» мая 2023 г.

Задание к исполнению принял  Сидорова Н.С.
подпись фамилия, инициалы
«19» мая 2023 г.

Выпускную квалификационную работу к защите допустить

Декан факультета  Кревчик В.Д.
подпись фамилия, инициалы
«22» 06 2023 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

Программа расчёта в среде программирования *MathCAD*

$$Mn := 0.1 \frac{m^2}{V \cdot s} \quad Eps0 := 8.86 \cdot 10^{-14} \frac{F}{m} \quad ni := 2 \cdot 10^{10} cm^{-3} \quad UprobN1 := 300V$$

$$fi := 0.025V \quad q := 1.6 \cdot 10^{-19} C \quad Nd := 3 \cdot 10^{13} \cdot cm^{-3}$$

$$Mp := 0.5 \frac{m^2}{V \cdot s}$$

РАСЧЁТ НАПРЯЖЕНИЯ ВКЛЮЧЕНИЯ ПАРАЗИТНОГО ТИРИСТОРА ПРИ УСЛОВИИ, ЧТО ОНО ВЫЗВАНО ИСКЛЮЧИТЕЛЬНО ЛАВИННЫМ РАЗМНОЖЕНИЕМ НОСИТЕЛЕЙ

$$Nn2 := 1 \cdot 10^{15} \cdot cm^{-3} \quad \text{- концентрации оснвных носителей в Б и Э}$$

$$Np2 := 3 \cdot 10^{12} \cdot cm^{-3}$$

$$tp2 := 0.3 \mu s \quad \text{- время жизни неосновных носителей заряда}$$

$$tn2 := 3 \mu s$$

$$Wp2 := 1.136 \times 10^{-4} m \quad \text{- толщина базы}$$

$$np0 := \frac{ni^2}{Np2} = 1.333 \times 10^{14} m^{-3} \quad \text{- концентрация неосносных нос. зар.}$$

$$pn0 := \frac{ni^2}{Nn2} = 4 \times 10^{11} m^{-3}$$

$$\mu n2 := 600 \cdot \frac{cm^2}{V \cdot s} \quad \mu p2 := 1300 \frac{cm^2}{V \cdot s} \quad \text{подвижность неосновных носителей в Б1 и Э1}$$

$$Dp2 := fi \cdot \mu p2 = 3.25 \times 10^{-3} \frac{m^2}{s}$$

$$Dn2 := fi \cdot \mu n2 = 1.5 \times 10^{-3} m^2 \cdot s^{-1}$$

$$Ln2 := \sqrt{tn2 \cdot Dn2} = 6.708 \times 10^{-5} m$$

$$Lp2 := \sqrt{tp2 \cdot Dp2} = 3.122 \times 10^{-5} m$$

$$\gamma_{npn} := 1 - \frac{pn0 \cdot Dp2 \cdot Wp2}{np0 \cdot Dn2 \cdot Lp2} = 0.976$$

$$\alpha_{npn} := 1 - \frac{Wp2^2}{2 \cdot Ln2^2} = -0.434$$

$$\alpha_{npn}(U) := \gamma_{npn} \cdot \alpha_{npn} \cdot M(U)$$

$$\alpha_{npn}(1V) = 0.424$$

$$M(U) := \frac{1}{1 - \left(\frac{U}{UprobN1} \right)^4}$$

$$M(1V) = 1$$

$$Uvkl := UprobN1 \cdot \sqrt[4]{1 - (\alpha_{npn}(1V))} = 261.395 m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$$

РАСЧЕТ С УЧЕТОМ ИСКЛЮЧИТЕЛЬНО НАКОПЛЕНИЯ В БАЗАХ

$$Mn := 0.1 \frac{m^2}{V \cdot s} \quad Eps0 := 8.86 \cdot 10^{-14} \frac{F}{m} \quad ni := 2 \cdot 10^{10} cm^{-3}$$

$$fi := 0.025V \quad q := 1.6 \cdot 10^{-19} C \quad Nd := 3 \cdot 10^{13} cm^{-3}$$

$$Mp := 0.5 \frac{m^2}{V \cdot s}$$

Коэфф передачи NPN транзистора

$$Nn2 := 1 \cdot 10^{15} cm^{-3} \quad - \text{концентрации оснвных носителей в Б и Э}$$

$$Np2 := 3 \cdot 10^{12} cm^{-3}$$

$$tp2 := 0.3 \mu s \quad - \text{время жизни неосновных носителей заряда}$$

$$tn2 := 3 \mu s$$

$$np0 := \frac{m^2}{Np2} = 1.33333 \times 10^{11} \frac{1}{L} \quad - \text{концентрация неосносных нос. зар.}$$

$$pn0 := \frac{m^2}{Nn2} = 4 \times 10^8 \frac{1}{L}$$

$$\mu n2 := 500 \frac{cm^2}{V \cdot s} \quad \mu p2 := 1300 \frac{cm^2}{V \cdot s} \quad \text{подвижность неосновых носителей в Б1 и Э1}$$

$$Dp2 := fi \cdot \mu p2 = 3.25 \times 10^{-3} \frac{m^2}{s}$$

$$Dn2 := fi \cdot \mu n2 = 0.00125 \frac{m^2}{s}$$

$$Ln2 := \sqrt{tn2 \cdot Dn2} = 6.124 \times 10^{-5} m$$

$$Lp2 := \sqrt{tp2 \cdot Dp2} = 3.1225 \times 10^{-5} m$$

$$\delta 2(U) := \sqrt{\frac{2 \cdot 12 \cdot Eps0 \cdot U}{q \cdot Np2}}$$

$$\gamma npn1(U) := 1 - \frac{pn0 \cdot Dp2 \cdot \delta 2(U)}{np0 \cdot Dn2 \cdot Lp2}$$

$$\alpha p1(U) := 1 - \frac{4 \delta 2(U)^2}{2 \cdot Ln2^2}$$

$$\alpha npn1(U) := \gamma npn1(U) \cdot \alpha p1(U)$$

$$\alpha npn1(641V) = 0.50077$$

Коэфф передачи PNP транзистора

$$Np1 := 1 \cdot 10^{15} \cdot \text{cm}^{-3} \quad tp1 := 0.3 \mu\text{s}$$

$$Nn1 := 3 \cdot 10^{12} \cdot \text{cm}^{-3} \quad tn1 := 3 \mu\text{s}$$

$$np1 := \frac{ni^2}{Np1} = 4 \times 10^8 \frac{1}{L} \quad pn1 := \frac{ni^2}{Nn1} = 1.33333 \times 10^{11} \frac{1}{L}$$

$$\mu n1 := 500 \cdot \frac{\text{cm}^2}{V \cdot s} \quad \mu p1 := 1300 \cdot \frac{\text{cm}^2}{V \cdot s}$$

$$Dp1 := fi \cdot \mu p1 = 3.25 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^2}{s}$$

$$Dn1 := fi \cdot \mu n1 = 0.00125 \frac{\text{m}^2}{s}$$

$$Ln1 := \sqrt{tn1 \cdot Dn1} = 6.124 \times 10^{-5} \text{m}$$

$$Lp1 := \sqrt{tp1 \cdot Dp1} = 3.1225 \times 10^{-5} \text{m}$$

$$\delta 1(U) := \sqrt{\frac{2 \cdot 12 \cdot \text{Eps0} \cdot U}{q \cdot Np2}}$$

$$W1(U) := 2 \cdot \delta 1(U)$$

$$\gamma_{pnp}(U) := 1 - \frac{np1 \cdot Dp1 \cdot W1(U)}{pn1 \cdot Dn1 \cdot Lp1}$$

$$\alpha_p(U) := 1 - \frac{W1(U)^2}{2 \cdot Ln1^2}$$

$$\alpha_p(500V) = -0.18133$$

$$\alpha_{pnp}(U) := \gamma_{pnp}(U) \cdot \alpha_p(U)$$

$$\alpha_{pnp}(641V) = 0.50077$$

$$\delta 2(641V) = 5.32882 \times 10^{-5} \text{m}$$

$$\gamma_{pnp}(641V) = 0.97338$$

$$SS(U) := |\alpha_{pnp}(U)| + |\alpha_{npn}(U)|$$

$$SS(641V) = 1.00155$$

$$\delta 1(640V) = 5.32466 \times 10^{-5} \text{m}$$

$$W1(640V) = 1.06493 \times 10^{-4} \text{m}$$

$$Mn := 0.1 \frac{m^-}{V \cdot s} \quad Eps0 := 8.86 \cdot 10^{-14} \frac{F}{m} \quad ni := 2 \cdot 10^{10} cm^{-3} \quad Nn2 := 1 \cdot 10^{15} \cdot cm^{-3}$$

$$fi := 0.025V \quad q := 1.6 \cdot 10^{-19} C \quad Nd := 3 \cdot 10^{13} \cdot cm^{-3} \quad Np22 := 5 \cdot 10^{12} \cdot cm^{-3}$$

$$Np2 := 10^{12} cm^{-3}, 2 \cdot 10^{12} \cdot cm^{-3} .. 5 \cdot 10^{14} \cdot cm^{-3}$$

$$Mp := 0.5 \frac{m^2}{V \cdot s}$$

$$tp2 := 0.3 \mu s \quad - \text{ время жизни неосновных носителей заряда}$$

$$tn2 := 3 \mu s$$

$$np0(Np2) := \frac{ni^2}{Np2} \quad - \text{ концентрация неосновных нос. зар.}$$

$$pn0 := \frac{ni^2}{Nn2} = 4 \times 10^{11} m^{-3}$$

$$\mu n2 := 500 \cdot \frac{cm^2}{V \cdot s} \quad \mu p2 := 1300 \frac{cm^2}{V \cdot s} \quad \text{подвижность неосновных носителей в Б1 и Э1}$$

$$Dp2 := fi \cdot \mu p2 = 3.25 \times 10^{-3} \frac{m^2}{s}$$

$$Dn2 := fi \cdot \mu n2 = 1.25 \times 10^{-3} m^2 \cdot s^{-1}$$

$$Ln2 := \sqrt{tn2 \cdot Dn2} = 6.124 \times 10^{-5} m$$

$$Lp2 := \sqrt{tp2 \cdot Dp2} = 3.122 \times 10^{-5} m$$

$$\gamma npn1(Np2) := 1 - \frac{pn0 \cdot Dp2 \cdot Wbp}{np0(Np2) \cdot Dn2 \cdot Lp2}$$

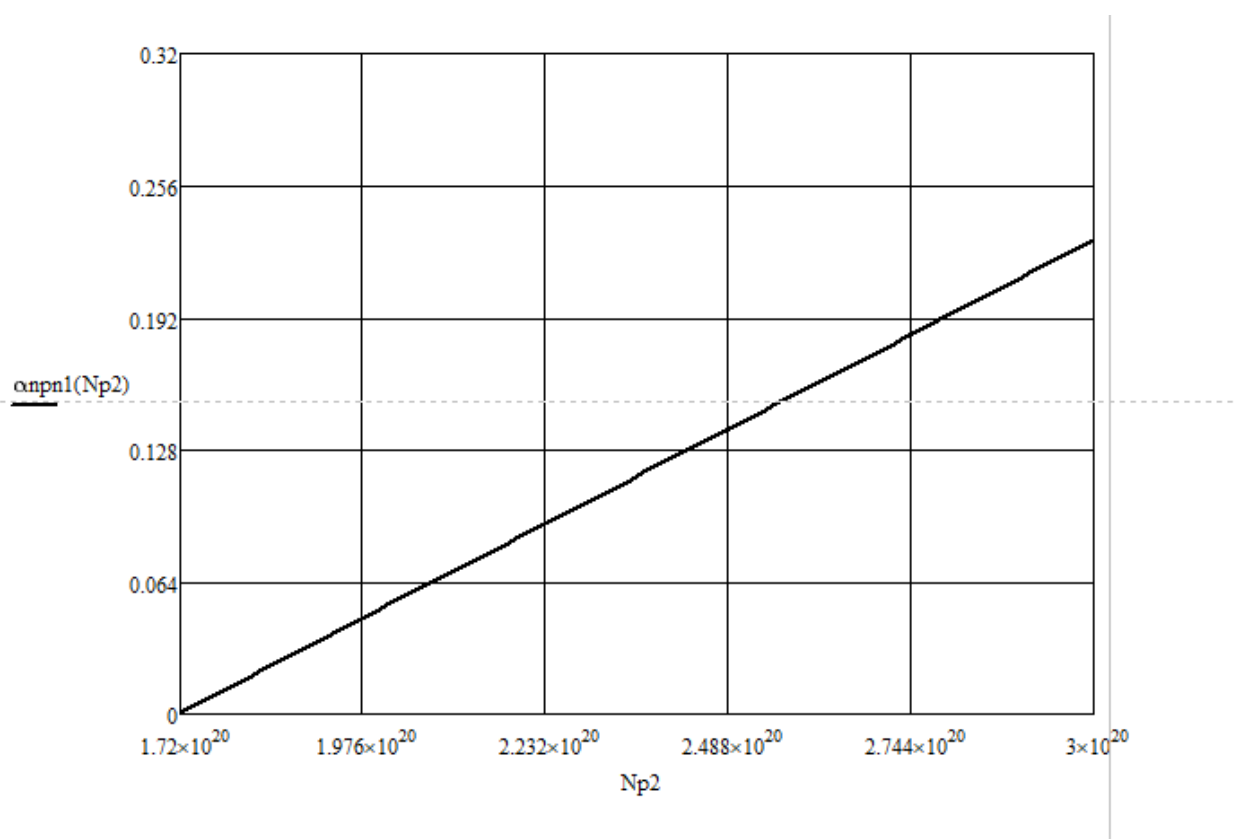
$$\alpha p1 := 1 - \frac{2Wbp^2}{2 \cdot Ln2^2}$$

$$\alpha npn1(Np2) := \gamma npn1(Np2) \cdot \alpha p1$$

$$Np := 2 \cdot 10^{14} cm^{-3} \quad wbn := 80 \mu m \quad \underline{\underline{\varepsilon_w}} := 11.8 \quad \varepsilon 0 := 8.84 \cdot 10^{-12} \frac{F}{m}$$

$$Ucm := \frac{q \cdot Np \cdot Wbp^2}{2 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon 0}$$

$$Ucm = 751.591 kg \cdot m^2 \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$$



N База

$$N_{p1} := 1 \cdot 10^{15} \cdot \text{cm}^{-3} \quad t_{p1} := 0.3 \mu\text{s}$$

$$t_{n1} := 3 \mu\text{s}$$

$$N_{n1} := 10^{13} \text{cm}^{-3}, 2 \cdot 10^{13} \cdot \text{cm}^{-3} \dots 5 \cdot 10^{14} \cdot \text{cm}^{-3}$$

$$n_{p1} := \frac{n_i^2}{N_{p1}} = 4 \times 10^{11} \text{m}^{-3} \quad p_{n1}(N_{n1}) := \frac{n_i^2}{N_{n1}}$$

$$\mu_{n1} := 500 \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{s}} \quad \mu_{p1} := 1300 \frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{s}}$$

$$D_{p1} := f_i \cdot \mu_{p1} = 3.25 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$D_{n1} := f_i \cdot \mu_{n1} = 1.25 \times 10^{-3} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$L_{n1} := \sqrt{t_{n1} \cdot D_{n1}} = 6.124 \times 10^{-5} \text{m}$$

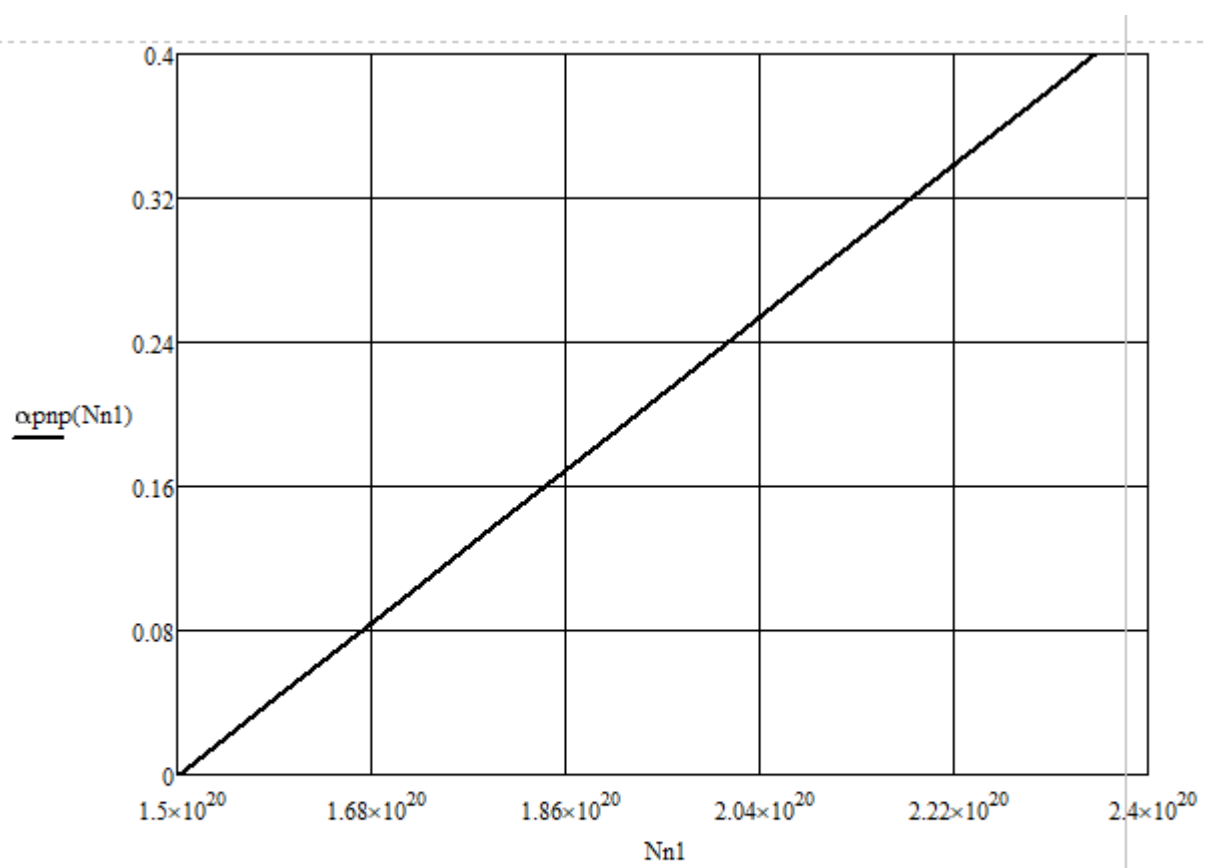
$$L_{p1} := \sqrt{t_{p1} \cdot D_{p1}} = 3.122 \times 10^{-5} \text{m}$$

$$\gamma_{pnp}(N_{n1}) := 1 - \frac{n_{p1} \cdot D_{p1} \cdot w_{bn}}{p_{n1}(N_{n1}) \cdot D_{n1} \cdot L_{p1}}$$

$$\alpha_p := 1 - \frac{2w_{bn}^2}{2 \cdot L_{n1}^2}$$

$$\alpha_{pnp}(N_{n1}) := \gamma_{pnp}(N_{n1}) \cdot \alpha_p$$

$$\alpha_p = -0.707$$



$$Nn := 1.5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$$

$$U_{cm2} := \frac{q \cdot Nn \cdot wbn^2}{2 \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0} = 736.253 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-1}$$

ПРИЛОЖЕНИЕ В
(обязательное)
Публикации по теме ВКР

СПИСОК

научных трудов Сидоровой Нины Сергеевны

№ п/п	Наименование работы, её вид	Форма работы	Выходные данные	Объем в п.л.	Соавторы
Научные труды					
1	Биполярный транзистор с изолированным затвором	Электронная	Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации («Шляндинские чтения – 2022»): материалы XIVМеждунар.науч.-техн. конф. с элементами науч. шк.и науч. – исслед.работ для студентов, аспирантов и молодых учёных. (г. Пенза, 24-26 октября)под ред. д-ра техн. наук Е.А. Печерской. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2022 г. – 330 с – Режим доступа: https://moluch.ru/archive/470/103921/ Дата обращения: 17.06.2023	5	

ПРИЛОЖЕНИЕ Г
(обязательное)
Иллюстративная часть

Расчёт и моделирование параметров и характеристик биполярного транзистора с изолированным затвором

ВЫПОЛНИЛА СТУДЕНТ ГРУППЫ 21ПДМ1:
СИДОРОВА Н.С.

РУКОВОДИТЕЛЬ:
К.Т.Н. ДОЦЕНТ ГОЛОВЯШКИН А.Н.



ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

РАСЧЁТ ПРЕДЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА С ИЗОЛИРОВАННЫМ ЗАТВОРОМ (БТИЗ), ОЦЕНКА НЕОБХОДИМОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ ДЛЯ ИЗБАВЛЕНИЯ ОТ ТИРИСТОРНОГО ЭФФЕКТА

ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ:

- ИЗУЧЕНИЕ ПРИЧИН ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЭФФЕКТА «ЗАЩЕЛКИВАНИЯ» СТРУКТУРЫ, РАСЧЁТ ПРОБОЙНОГО НАПРЯЖЕНИЯ;
- СОСТАВЛЕНИЕ МОДЕЛИ РАСЧЁТА НАПРЯЖЕНИЯ ПРОБОЯ ПРИ ОБРАТНОМ ВКЛЮЧЕНИИ;
- ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ С ЦЕЛЬЮ ПОЛНОГО ИЗБАВЛЕНИЯ ОТ ПАРАЗИТНОГО ТИРИСТОРНОГО ЭФФЕКТА

Эффект «защелкивания» структуры

Транзистор может продолжать удерживать высокий ток, даже если сигнал на затвор прекращен. В результате транзистор не переходит в режим отсечки и продолжает пропускать ток, что может привести к перегреву устройства и его повреждению

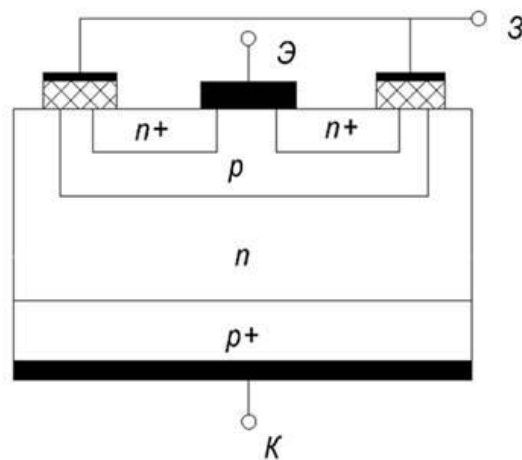


Рисунок 1 – Структура БТИЗ

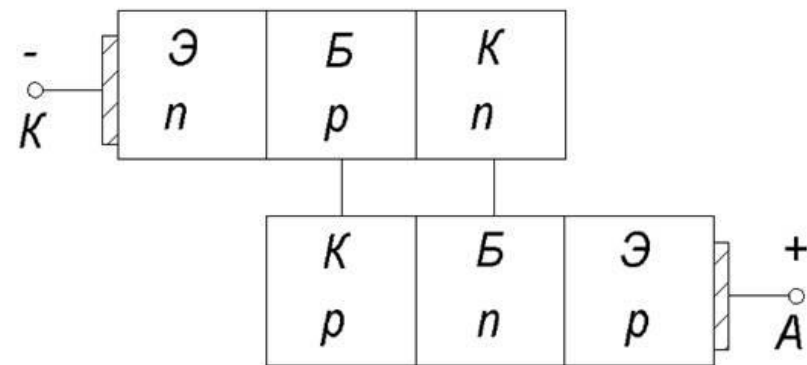
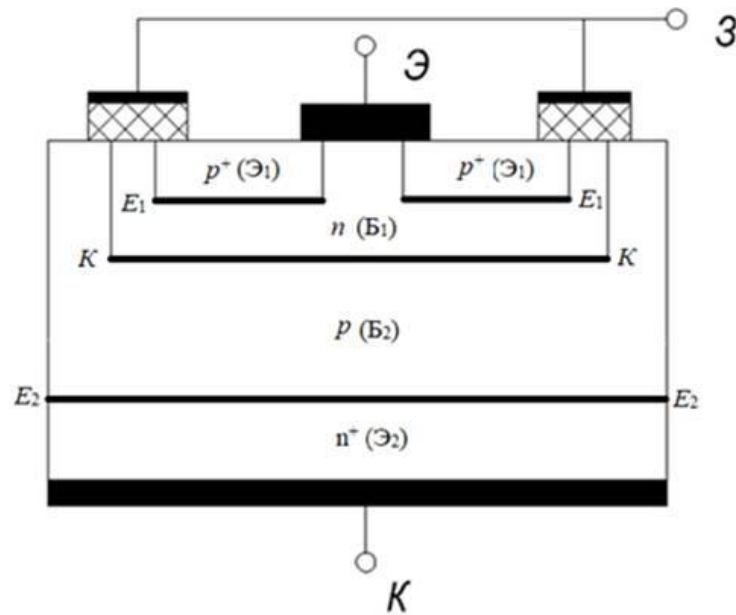


Рисунок 2 – Условное разделение динистора на два транзистора

Причины возникновения эффекта «защелкивания» структуры

- Процесс накопления носителей в базах;
- Процесс лавинного умножения носителей заряда;
- Одновременное действие обоих процессов

Накопление носителей заряда в базах



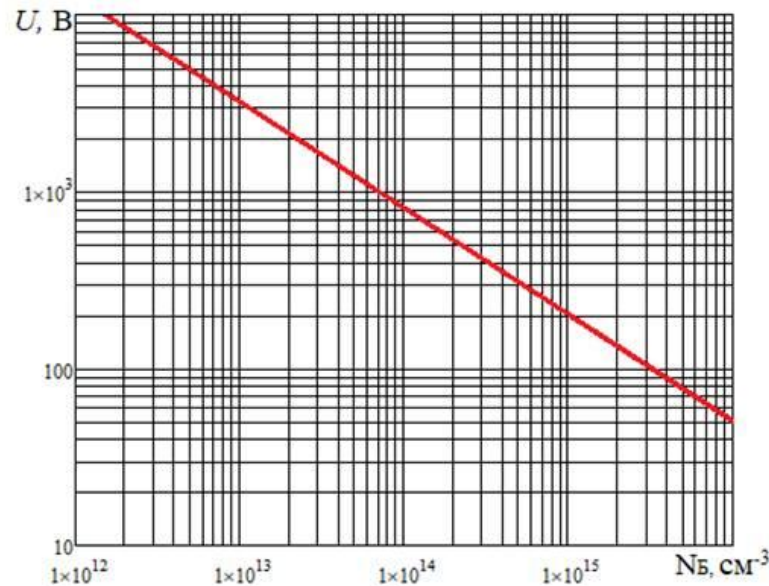
$$|\alpha_{pnp}| + |\alpha_{npn}| = 1$$

где α_{pnp} – коэффициент передачи комплиментарного транзистора $p-n-p$; α_{npn} – коэффициент передачи комплиментарного транзистора $n-p-n$.

Условие $|\alpha_{pnp}| + |\alpha_{npn}| = 1$ выполняется при напряжении 641 В.

Рисунок 3 – Структура БТИЗ

Лавинное умножение носителей заряда



$N_{B1}, N_{B2} = 3 \cdot 10^{13} \text{cm}^{-3}$ – концентрация примеси в базах

По данному графику видно, что при выбранном нами значении концентрации примеси напряжение, при котором произойдет защелкивание структуры исключительно благодаря лавинному размножению носителей, превышает 1000 В. Следовательно, в нашем случае им можно пренебречь, так накопление заряда в базах произойдет значительно раньше.

Рисунок 4 – Зависимость пробивного напряжения при лавинном пробое от концентрации примеси в базе

Моделирование тиристорной структуры в закрытом состоянии при обратном включении

Напряжение пробоя при обратном включении:

$$U_{об} = U_k (1 - \alpha_{npn})^{n_B}$$

где n_B – коэффициент, изменяющийся в диапазоне от 4 до 10 при различных значениях напряжения пробоя; U_k – напряжение пробоя коллекторного перехода.

Получившееся значение напряжения пробоя составляет 261 В.

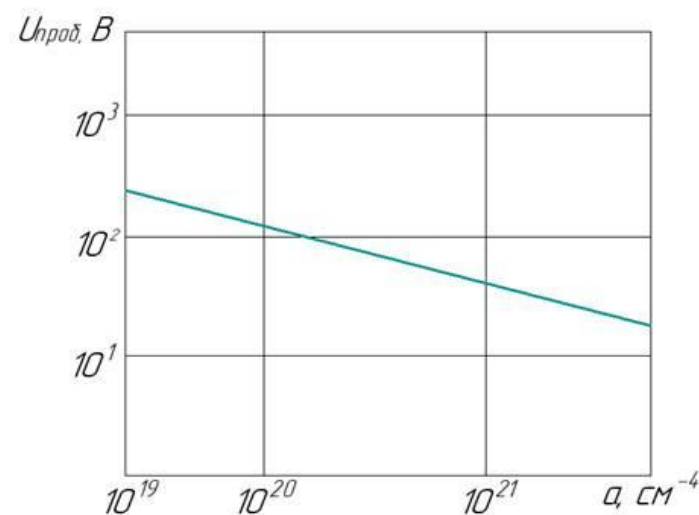


Рисунок 5 – Зависимость напряжения при лавинном пробое от градиента концентрации примесей в p - n -переходе

Проектирование структуры. База p -типа

$$|\alpha_{pnp}| + |\alpha_{npr}| = 1 - \text{условие пробоя структуры}$$

Необходимо определить концентрацию примеси, при которой сумма коэффициентов передачи близка к нулю

По графику видно, что ближайшая к нулю концентрация примеси примерно равна $1,72 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$

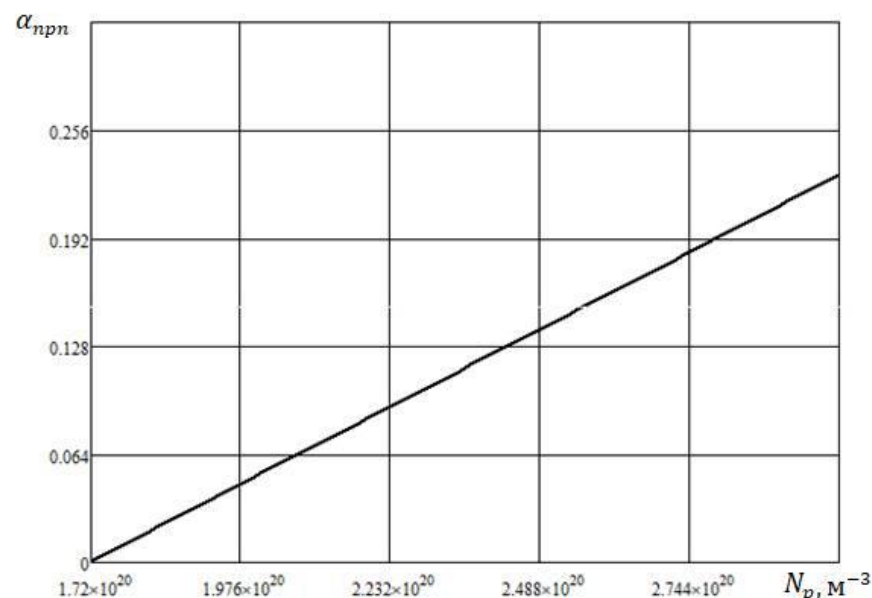


Рисунок 6 — Зависимость коэффициента передачи от концентрации примеси в базе p -типа

Проектирование структуры. База n -типа

По графику видно, что ближайшая к нулю концентрация примеси примерно равна $1.5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$



Рисунок 7 – Зависимость коэффициента передачи от концентрации примеси в базе n -типа

Проектирование структуры. Напряжение смыкания

$$U_{\text{см}} = \frac{qN_D W_N^2}{2\varepsilon_s}$$

где W_N – ширина базы; ε_s – диэлектрическая проницаемость, N_D – концентрация доноров

Напряжение смыкания p -базы – 615 В

Напряжение смыкания n -базы – 902 В

Вывод:

- Подробно изучены основные причины возникновения эффекта «защелкивания» структуры, а также произведен расчёт для двух конкретных причин.
- Составлена модель расчёта тиристорной структуры БТИЗ в закрытом состоянии при обратном включении.
- Определена концентрация базовых примесей при которых полностью исключена возможность возникновения эффекта «защелкивания» структуры.

Спасибо за внимание!

ПРИЛОЖЕНИЕ Д
(обязательное)
Антиплагиат

Ректору Пензенского
государственного университета
А. Д. Гулякову
студента 2 курса ФИТЭ
очной формы обучения
Сидоровой Нины Сергеевны

ЗАЯВЛЕНИЕ

Я, Сидорова Нина Сергеевна, студентка 2 курса очной формы обучения направления подготовки 11.04.04 «Электроника и микроэлектроника», магистерская программа «Нано- и микроэлектроника», прошу провести проверку с использованием системы «Антиплагиат» выпускной квалификационной работы на тему «Расчёт и моделирование параметров и характеристик биполярного транзистора с изолированным затвором», выполненной мной самостоятельно, на содержание элементов плагиата.

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

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


06.06.2023

ВКР представлена на проверку 06.06.2023

Руководитель ВКР 

Протокол

проверки на оригинальность в системе «Антиплагиат.ВУЗ» выпускной квалификационной работы на тему «Расчёт и моделирование параметров и характеристик биполярного транзистора с изолированным затвором» студента 2 курса Н.С. Сидоровой направления подготовки/специальности 11.04.04 «Электроника и микроэлектроника»

профиля/магистерской программы «Нано- и микроэлектроника»

Руководитель ВКР: Головашкин А.Н.



СПРАВКА

о результатах проверки текстового документа
на наличие заимствований

Пензенский государственный университет

ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНА В СИСТЕМЕ АНТИПЛАГИАТ.ВУЗ

Автор работы: Сидорова Нина Сергеевна
Самочитирование
рассчитано для: Сидорова Нина Сергеевна
Название работы: Расчёт и моделирование параметров и характеристик биполярного транзистора с изолированным затвором
Тип работы: Магистерская диссертация
Подразделение: Кафедра "Нано- и микроэлектроника"

РЕЗУЛЬТАТЫ

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

СОВПАДЕНИЯ	41.08%	СОВПАДЕНИЯ	39.4%
ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	68.33%	ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	60.01%
ЦИТИРОВАНИЯ	0.59%	ЦИТИРОВАНИЯ	0.59%
САМОЦИТИРОВАНИЯ	0%	САМОЦИТИРОВАНИЯ	0%

ДАТА ПОСЛЕДНЕЙ ПРОВЕРКИ: 06.06.2023

ДАТА И ВРЕМЯ КОРРЕКТИРОВКИ: 06.06.2023 15:39

Структура документа: Проверенные разделы: основная часть с.1, 3-51, содержание с.2

Модуль поиска:

ИПС Адилет; Библиография; Сводная коллекция ЗБС; 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: Головашкин Алексей Николаевич

ФИО проверяющего

Дата подписи: 06.06.23

Подпись проверяющего



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

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

06.06.2023

Головашкин А.Н.

СПРАВКА

Пензенский государственный университет

о результатах проверки текстового документа
на наличие заимствований

ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНА В СИСТЕМЕ АНТИПЛАГИАТ.ВУЗ

Автор работы: Сидорова Нина Сергеевна
Самоцитирование
рассчитано для: Сидорова Нина Сергеевна
Название работы: Расчёт и моделирование параметров и характеристик биполярного транзистора с
изолированным затвором
Тип работы: Магистерская диссертация
Подразделение: Кафедра "Нано- и микроэлектроника"

РЕЗУЛЬТАТЫ

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

СОВПАДЕНИЯ		41.08%	СОВПАДЕНИЯ		39.4%
ОРИГИНАЛЬНОСТЬ		58.33%	ОРИГИНАЛЬНОСТЬ		60.01%
ЦИТИРОВАНИЯ		0.59%	ЦИТИРОВАНИЯ		0.59%
САМОЦИТИРОВАНИЯ		0%	САМОЦИТИРОВАНИЯ		0%

ДАТА ПОСЛЕДНЕЙ ПРОВЕРКИ: 06.06.2023

ДАТА И ВРЕМЯ КОРРЕКТИРОВКИ: 06.06.2023 15:39

Структура документа: Проверенные разделы: основная часть с.1, 3-51, содержание с.2
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: 06.06.23



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 ВЫПУСКНОЙ РАБОТЫ МАГИСТРА

Выпускная работа магистра на тему

«Расчёт и моделирование параметров и характеристик биполярного транзистора с изолированным затвором»

Выполнена студентом (ой) Н.С. Сидоровой
(инициалы, фамилия)

Факультет информационных технологий и электроники

Кафедра НиМЭ Группа 21ПДм1

Направление подготовки 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»

Магистерская программа «Нано- и микроэлектроника»

Квалификация (степень) Магистр

Руководитель Головяшкин Алексей Николаевич
(фамилия, имя, отчество)

к.т.н., доцент, кафедра «НиМЭ»
(должность и место работы)

Качества выпускника, выявленные в ходе выполнения магистерской работы

В ходе выполнения ВКР студентка Сидорова Н.С. продемонстрировала очень высокий уровень освоения профессиональных компетенций, связанных с основными областями профессиональной деятельности: проектно-конструкторской и проектно-технологической. При решении задач технического задания ВКР Сидорова Н.С. продемонстрировала великолепный уровень теоретической и практической подготовки по основным базовым дисциплинам образовательной программы, особенно по дисциплинам расчёта, моделирования и технологии полупроводниковых компонентов электронной техники. В ходе выполнения работы были продемонстрированы отличные навыки работы с ПК, знание компьютерных технологий и умения использовать прикладное программное обеспечение для проведения и автоматизации инженерных расчетов, разработки чертежей, оформления технической и текстовой документации. В период выполнения ВКР Сидорова Н.С. продемонстрировала высокую степень самостоятельности, проявленную при решении конкретных сложных задач представленной работы.

Заключение

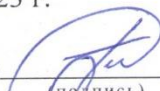
Тема, уровень сложности и качество оформление ВКР соответствуют требованиям ФГОС ВО и внутренних нормативных документов ПГУ. Техническое задание ВКР выполнено в полном объеме. Основные результаты ВКР можно рекомендовать к внедрению в учебный процесс и публикации в научно-технических изданиях.

На основании вышеизложенного считаю, что студентка Сидорова Нина Сергеевна достойна присуждения квалификации магистра по направлению 11.04.04 «Электроника и нанoeлектроника», а выпускная квалификационная работа заслуживает оценки «отлично».

Прошу ГЭК дать рекомендацию Сидоровой Н.С. для поступления в аспирантуру

«14» июня 2023 г.

Руководитель


(подпись)

А.Н. Головяшкин
(инициалы, фамилия)

Рецензия
на выпускную работу магистра
студентки кафедры НиМЭ, группы 21ПДм1
Сидоровой Нины Сергеевны

На тему: «Расчёт и моделирование параметров и характеристик биполярного транзистора с изолированным затвором»,
по направлению 11.04.04 «Электроника и нанoeлектроника»

Целью рецензируемой работы является расчёт предельных напряжений биполярного транзистора с изолированным затвором, оценка необходимости изменения структуры для увеличения пробойного напряжения.

Биполярные транзисторы с изолированным затвором на данный момент являются самыми распространёнными приборами силовой электроники в области коммутируемых мощных токов и напряжений.

Однако их специфичная структура несет в себе ряд как преимуществ, так и недостатков, накладывающих серьезные ограничения на их применение. Один из недостатков — эффект так называемого «зашелкивания».

В результате данной работы были определены основные причины возникновения эффекта «зашелкивания» структуры, составлен алгоритм расчёта для двух основных причин. Произведено моделирование тиристорной структуры БТИЗ в закрытом состоянии при обратном включении, рассчитано предельное напряжение при обратном включении. На основании полученных значений дана оценка необходимых изменений структуры при проектировании.

Работа выполнена в полном соответствии с заданием, показывает знания автора в общетехнических и специальных дисциплинах, умение пользоваться компьютерными технологиями.

Достоинством данной работы является созданная программа для автоматизированного расчета параметров транзистора, которая упрощает его проектирование.

Незначительным замечанием к работе может быть отсутствие упоминания других способов решения проблемы «зашелкивания» БТИЗ (технологический, схемотехнический), а также малый список современных источников по теме, однако данное замечание не снижает научной и практической ценности работы.

На основании вышеизложенного считаю, что выпускная работа заслуживает оценки «отлично», а студентка Сидорова Нина Сергеевна достойна присуждения квалификации магистра по направлению 11.04.04 «Электроника и нанoeлектроника».

«19» июня 2023 г.

Директор — гл. конструктор
НПЦ «Крона»

(подпись)



Ханбеков В.Г.

(инициалы, фамилия)