

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
МОРДОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМ. Н. П. ОГРЁВА»

Институт электроники и светотехники  
Кафедра электроники и нанoeлектроники

УТВЕРЖДАЮ


Зав. кафедрой

канд. тех. наук, доцент

 Н. Н. Беспалов

«19» 06 2019 г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**  
**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА И АППАРАТУРЫ ДЛЯ**  
**ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МИКРОСХЕМ**

Автор магистерской диссертации 14.06.2019  К. Ю. Панькин

Обозначение магистерской диссертации МД-02069964 – 11.04.04 – 11 – 19


Направление 11.04.04. Электроника и нанoeлектроника

Руководитель работы

к. т. н., доцент


14.06.2019  Ю. В. Горячкин

Нормоконтролер

 14.06.2019 А. А. Шестёркина

Рецензент

к. т. н., доцент

 19.06.19 Федотов Ю. Б.

Саранск

2019

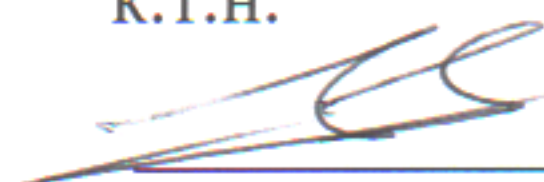
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ МОРДОВСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Н. П. ОГАРЁВА»

Институт электроники и светотехники  
Кафедра электроники и нанoeлектроники

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

К.Т.Н.



Н. Н. Беспалов

«27» 09 2017 г.

**ЗАДАНИЕ НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ**

(в форме магистерской диссертации)

Студент Панькин Кирилл Юрьевич

1 Тема Разработка и исследование метода и аппаратуры для определения теплового сопротивления микросхем

Утверждена приказом по МордГУ №7518-с от 26.09.2017 г.

2 Срок представления работы к защите 17.06.2019

3 Исходные данные для научного исследования:

3.1 Провести исследование теплового сопротивления переход-корпус микросхемы 124КТ1 производства ОАО «Орбита» на основе моделирования в среде TCAD.

3.2 Параметры микросхемы 124КТ1:

- максимальный ток коллектора 100 мА;
- обратное напряжение коллектор-база 20 В;
- обратное напряжение эмиттер-база 30 В;
- предельная рабочая температура 125 °С;

– тепловое сопротивление переход-корпус, измеренное на ЗАО «ПКК Миландр» 56 °С/Вт;

– металлоглазанный круглый корпус 301.8-2.

### 3.3 Параметры структуры кристалла микросхемы 124КТ1:

– толщина кристалла 400 мкм;

– толщина эпитаксиального (базового) слоя 7 мкм;

– толщина эмиттерного слоя 4 мкм;

– толщина коллекторного слоя 7 мкм;

– толщина слоя алюминия Al 1 мкм;

– размер кристалла 800×800×400 мкм.

3.4 Режимы моделирования микросхемы 124КТ1 при воздействии испытательных импульсов тока:

– транзисторы в диодном включении на переходе коллектор-база;

– повышенная рабочая температура 125 °С;

– амплитуда первого мощного импульса греющего тока 100 мА, длительность 5 с;

– амплитуда второго и последующих маломощных импульсов греющего тока 3 мА, длительность 5 с;

– амплитуда импульсов измерительного тока 1 мА, длительность 10 мкс;

– задержка импульсов измерительного тока относительно заднего фронта импульсов греющего тока от 2 до 200 мкс.

### 3.5 Программное обеспечение:

- программный пакет Multisim, позволяющий моделировать электронную схему управляемого источника тока;

- программа среда LabVIEW для написания программы управления источником тока;

- блок управления NI CompactRIO;

- среда приборно-технологического моделирования SynopsysRCAD, необходимая для моделирования полупроводниковых структур и приборов.

#### 4 Содержание выпускной квалификационной работы

4.1 Введение

4.2 Методы определения теплового сопротивления микросхем

4.3 Определение теплового сопротивления микросхем на основе моделирования в среде TCAD

4.4 Модифицированный метод определения теплового сопротивления

4.5 Разработка управляемого источника тока

4.6 Заключение

4.7 Список использованных источников

#### 5 Приложения

ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное) Текст командного файла для создания модели микросхемы 124КТ1 в программе Structure Editor.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б (обязательное) Текст командного файла для программы Setaurus Device.

ПРИЛОЖЕНИЕ В (обязательное) Электрическая принципиальная схема управляемого источника тока

ПРИЛОЖЕНИЕ Г (обязательное) Перечень элементов.

ПРИЛОЖЕНИЕ Д (обязательное) Код программы LabVIEW.

Руководитель работы

к.т.н., доцент

27.09.2017



Ю. В. Горячкин

Задание принял к исполнению

27.09.2017



К. Ю. Панькин

## РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация содержит 79 страниц, 32 рисунка, 6 таблиц, 19 использованных источников, 9 приложений.

ТЕПЛОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ, ТЕРМОЧУСТВИТЕЛЬНЫЙ ПАРАМЕТР, ОСТ, ТОК, ПАДЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЕ, P-N ПЕРЕХОД УПРАВЛЯЕМЫЙ ИСТОЧНИК ТОКА, МОДЕЛИРОВАНИЕ, NATIONAL INSTRUMENTS, COMPACTRIO.

Объектом исследования являлись методы определения теплового сопротивления и микросхема 124КТ1.

Цель работы — анализ и освоение методов определения теплового сопротивления микросхем, изложенных в ОСТ 11 0944-96 для определения теплового сопротивление микросхемы 124КТ1 производства ОАО «Орбита».

В результате проделанной работы проведён анализ научно-технической литературы по тепловому сопротивлению микросхем и изучен ОСТ 11 0944-96. Выявлены преимущества и недостатки методов определения теплового сопротивления микросхем, описанные в ОСТ 11 0944-96. Разработана модель кристалла микросхемы 124КТ1, для которой определено тепловое сопротивление переход-корпус и оптимальное время задержки  $t_{зд}$ , при котором достигается минимальная относительная погрешность при определении теплового сопротивления. Разработан управляемый источник тока и программа для управления источником.

Практическая ценность:

1) разработанный управляемый источник тока может быть использован для дальнейшей разработки аппаратно-программного комплекса для определения ряда электрических и тепловых характеристик микросхем и других полупроводниковых приборов и, в частности, теплового сопротивления.

<i>МД – 02069964 – 11.04.04 – 11 – 19</i>				
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>
<i>Разраб.</i>		Панькин К. Ю.	<i>[Подпись]</i>	14.06.19
<i>Пров.</i>		Горячкин Ю. В.	<i>[Подпись]</i>	14.06.19
<i>Реценз.</i>		Федотов Ю.Б.	<i>[Подпись]</i>	19.06.19
<i>Н. контр.</i>		Шестеркина А.А.	<i>[Подпись]</i>	14.06.19
<i>Утв.</i>		Беспалов Н.Н.	<i>[Подпись]</i>	19.06.19
<i>Разработка и исследование метода и аппаратуры для определения теплового сопротивления микросхем</i>				
			<i>Лит</i>	<i>Лист</i>
			5	79
<i>МГУ им. Н. П. Огарёва ИЭС ЭНЭ 611 гр.</i>				

Научная новизна:

1) разработан модифицированный метод, который позволяет быстро, с высокой точностью и главное удобно определять тепловое сопротивление микросхем;

2) разработана программа управления источником тока в программной среде LabVIEW на базе контролера CompactRIO, которая позволяет сформировать необходимой длительности импульсы тока и позволяет удобно коммутировать два плеча источника тока.

## Сокращения слов

Таблица 1 — Сокращения часто употребляемых слов

Слово (словосочетание)	Сокращение
Источник тока	ИТ
Отраслевой стандарт	ОСТ
Операционный усилитель	ОУ
Полупроводниковый прибор	ПП
Технические условия	ТУ
Термочувствительный параметр	ТЧП
Управляемый источник тока	УИТ
Температурный коэффициент напряжения	ТКН
National Instruments	NI

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	9
1 Методы определения теплового сопротивления микросхем	11
1.1 Метод определения теплового сопротивления с контролем температуры кристалла с помощью термоэлектрического преобразователя	11
1.1.1 Принцип, условия, режим измерений и аппаратуры	11
1.1.2 Проведение измерений	14
1.1.3 Обработка результатов измерений	15
1.2 Метод определения теплового сопротивления с контролем температуры кристалла по термочувствительному параметру	16
1.2.1 Принцип и условия измерений	16
1.2.2 Способ постоянной температуры кристалла	17
1.2.3 Способ определения при двух значениях мощности и температуры	20
1.3 Выводы	22
2 Определение теплового сопротивления микросхем на основе моделирования в среде TCAD	24
2.1 Назначение, конструкция и основные параметры микросхемы 124КТ1	24
2.2 Разработка командного файла для создания модели микросхемы 124КТ1	26
2.3 Моделирование микросхемы 124КТ1 при определении теплового сопротивления методом 2	30
2.4 Моделирование микросхемы 124КТ1 при определении теплового сопротивления методом 3, способ постоянной температуры	35
2.5 Выводы	41
3 Модифицированный метод определения теплового сопротивления	43
3.1 Принцип измерений по модифицированному методу	43
3.2 Условия и проведение моделирования варианта 1 и варианта 2	46

					МД – 02069964 – 11.04.04 – 11– 19	Лист
Изм.	Лист	№ док-м	Подпись	Дата		8



3.3	Обработка результатов и определение теплового сопротивления микросхемы 124КТ1	48
3.4	Выводы	49
4	Разработка управляемого источника тока	50
4.1	Разработка функциональной схемы управляемого источника тока	50
4.2	Разработка электрической принципиальной схемы управляемого источника тока	51
4.3	Разработка модели управляемого источника тока в программе Multisim	53
4.4	Разработка программы управления источником тока в LabVIEW	56
4.5	Выводы	64
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	65
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	67
	ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное) Текст командного файла для создания модели микросхемы 124КТ1 в программе StructureEditor.	69
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б (обязательное) Текст командного файла для программы SentaurusDevice.	73
	ПРИЛОЖЕНИЕ В (обязательное) Электрическая принципиальная схема управляемого источника тока	
	ПРИЛОЖЕНИЕ Г (обязательное) Перечень элементов	
	ПРИЛОЖЕНИЕ Д (обязательное) Код программы LabVIEW.	75

## ВВЕДЕНИЕ

Тепловое сопротивление полупроводниковых приборов (ПП) в установившемся режиме является одним из важнейших их параметров, по величине которого можно оценивать их качество изготовления, температуру кристалла в различных режимах эксплуатации и проводить отбраковку потенциально ненадёжных приборов.

В промышленных условиях на выходном и входном контроле контролируются тепловые сопротивления переход-корпус и переход-среда, которые указываются в паспортах ПП и микросхем и определяют приращение температуры активной области (*p-n* перехода) ПП и микросхем по отношению к корпусу или к окружающей среде соответственно при заданном приращении электрической мощности. В известных косвенных методах при измерении тепловых сопротивлений используется переключение ПП и микросхем из режима нагрева заданной статической электрической мощностью в режим измерения ТЧП. При этом требуется обеспечить измерение малых изменений ТЧП на фоне больших средних значений и случайных помех за малое время, пока температура активной области не успевает заметно измениться [13].

ОСТ 11 0944-96 устанавливает три основных метода определения теплового сопротивления [9].

Метод 1. Метод определения теплового сопротивления с контролем температуры кристалла с помощью инфракрасного микропирометра.

Метод 2. Метод определения теплового сопротивления с контролем температуры кристалла с помощью термоэлектрического преобразователя.

Метод 3. Метод определения теплового сопротивления с контролем температуры кристалла по термочувствительному параметру.

Этот метод устанавливает два способа определения теплового сопротивления:

- способ постоянной температуры кристалла;
- способ определения при двух значениях мощности и температуры.

					МД– 02069964 – 11.04.04 – 11– 19	Лист
						10
Изм.	Лист	№ док-м	Подпись	Дата		

В работе будут рассмотрены два метода определения теплового сопротивления из ОСТ 11 0944-96:

1) метод 2 метод определения теплового сопротивления с контролем температуры кристалла с помощью термоэлектрического преобразователя;

2) метод 3 метод определения теплового сопротивления с контролем температуры кристалла по термочувствительному параметру, способ постоянной температуры.

Второй способ метода 3 не рассматривался по причине того, что для определения теплового сопротивления необходимо определять ТКН микросхемы. Первый метод не рассматривался по причине того, что в ОСТ11 0944-96 сказано, что данный метод изложен в ОСТ 11 073.073-82. Данный ОСТ в библиотеке университета утерян, а в сети Internet найти его не удалось.

Целью магистерской диссертации являлось анализ и освоение методов определения теплового сопротивления микросхем, изложенных в ОСТ 11 0944-96, разработка управляемого источника тока и модифицированного метода определения теплового сопротивления микросхем с помощью, которого определить тепловое сопротивление микросхемы 124КТ1 производства ОАО «Орбита»[19].

Экспериментальное исследование электрических и тепловых параметров структур ПП и микросхем требует наличия специальной высокоточной измерительной аппаратуры, которые являются достаточно дорогостоящими. Кроме того, точно измерить температуру внутри кристалла практически невозможно. Поэтому возникает потребность в дополнительном инструменте, с помощью которого возможно анализировать зависимости характеристик приборов от режимов работы и температуры. В настоящее время таким инструментом является компьютерное приборно-технологическое моделирование, которое стало повсеместно доступным за счёт бурного развития компьютерной техники.

При анализе существующих методов определения теплового сопротивления установлено, что данные методы устарели и на сегодняшний

					МД– 02069964 –11.04.04 –11– 19	Лист
						11
Изм.	Лист	№ док-м	Подпись	Дата		

день требуется либо разработка новых методов или модифицирование старых. Такие методы должны реализовываться с помощью быстродействующих устройств, позволяющих производить более точно, удобно и с высокой скоростью определение теплового сопротивления микросхем.

Научная новизна работы заключается в разработке модифицированного метода определения теплового сопротивления микросхем и других полупроводниковых приборов, который позволяет удобно и с высокой точностью определяться тепловое сопротивление.

					МД- 02069964 – 11.04.04 – 11- 19	Лист
						12
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

## **1 Методы определения теплового сопротивления микросхем**

Существует три основных метода определения теплового сопротивления микросхем [9]:

- метод 1. Метод определения теплового сопротивления с контролем температуры кристалла с помощью инфракрасного микропирометра. Метод распространяется на микросхемы в корпусах с внутренней полостью;

- метод 2. Метод определения теплового сопротивления с контролем температуры кристалла с помощью термоэлектрического преобразователя. Метод распространяется на микросхемы в корпусах с внутренней полостью;

- метод 3. Метод определения теплового сопротивления с контролем температуры кристалла по термочувствительному параметру. Метод распространяется на микросхемы в монолитных корпусах и в корпусах с внутренней полостью.

Далее будут рассмотрены методы 2 и 3. Метод 1 не рассматривался, т.к. в [9] сказано, что данный метод изложен в ОСТ 11 073.073-82. Данный ОСТ в библиотеке университета утерян, а в сети Internet найти его не удалось.

### **1.1 Метод определения теплового сопротивления с контролем температуры кристалла с помощью термоэлектрического преобразователя**

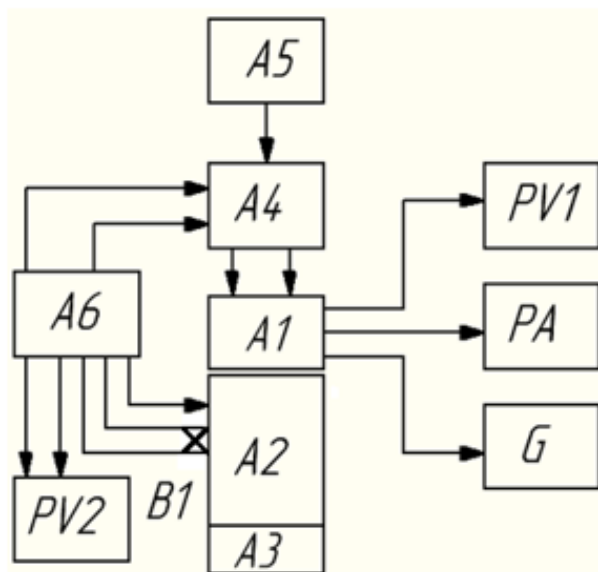
#### **1.1.1 Принцип, условия, режим измерений и аппаратура**

Метод заключается в определении температуры поверхности кристалла микросхемы при рассеянии в нем электрической мощности путем контакта термозонда типа ТХК с выбранной точкой кристалла. Одновременно регистрируются температура корпуса (теплоотвода) и мощность рассеивания микросхемы.

Измерения проводятся на микросхемах с удаленной крышкой.

					МД– 02069964 – 11.04.04 – 11 – 19	Лист
						13
Изм.	Лист	№ док-м	Подпись	Дата		

Измерения следует проводить на установке, структурная схема которой приведена на рисунке 1.1.



A1 – микросхема;  
 A2 – теплоотвод;  
 A3 – координатный стол;  
 A4 – термозонд;  
 A5 – устройство перемещения термозонда;  
 A6 – устройство контроля и регулирования температуры;  
 PA – амперметр;  
 PV1 – вольтметр;  
 PV2 – цифровой измеритель температуры;  
 G – источник питания;  
 B1 – термопара ТХК.

Рисунок 1.1 — Структурная схема установки

Координатный стол A3 предназначен для управляемого перемещения столика с установленной на нем микросхемой. Диапазон перемещения по координатам должен быть не менее 40 мм.

Термозонд A4 должен обеспечивать измерение температуры в отдельных точках поверхности кристалла микросхемы. Датчик температуры – термопара типа ТХК. Диаметр термоэлектродов должен быть не более 0,2мм. Горячий спай должен быть образован путем сварки и снабжен медным диском. Термоэлектроды должны быть изолированы до горячего спая.

Устройство перемещения термозонда A5 должно быть снабжено координатным столиком.

Устройство контроля и регулирования температуры A6 должно обеспечивать:

- диапазон контроля и регулирования температуры от +25 С до +150 С;
- теплоноситель – сжатый воздух;

-предел допустимой абсолютной основной погрешности 1 °С;

- датчик – термоэлектрический преобразователь типа ТХК.

Ротаметр А7 должен обеспечивать расход воздуха через теплообменник с погрешностью не более 2.5 %.

РА– амперметр постоянного тока класса 1,0.

PV1 – вольтметр постоянного напряжения класса 1,0.

PV2 – цифровой прибор, предназначенный для измерения постоянного тока и температуры при помощи термоэлектрических преобразователей. Погрешность измерения температуры не должна превышать 3 °С в пределах измерения от -50 °С до +200 °С.

Подготовка к проведению измерений

Выполняют разгерметизацию микросхемы по методу 409-15 ОСТ 11 073 013.

Подготавливают к работе и включают схему, предусмотренную для испытаний на безотказность и в соответствии с эксплуатационной документацией.

Закрепляют пружинным прижимом микросхему А1 в контактирующем устройстве на теплоотводе А2 и устанавливают их на координатном столе А3 стенда контроля температуры кристалла.

Устанавливают с помощью ротаметра расход воздуха через теплоотвод 4-6 м<sup>3</sup>/час.

Перемещением координатного стола А3 устанавливают центр кристалла микросхемы под термозондом.

Опускают термозонд с помощью устройства А4 до соприкосновения с поверхностью кристалла.

С помощью устройства контроля и регулирования температуры А6 удерживают температуру теплоотвода, равной повышенной рабочей температуре согласно техническим условиям на микросхему.

					МД– 02069964 – 11.04.04 – 11 – 19	Лист
Изм.	Лист	№ док.им.	Подпись	Дата		15

## 1.1.2 Проведение измерений

Выдерживают микросхему в течение времени, достаточного для достижения установившегося значения температуры корпуса (5-10 мин).

Заносят в протокол измерений температуру выбранной точки кристалла микросхемы  $T_{KI}$  и температуру корпуса по показаниям цифрового измерителя температуры PV2.

Подают на микросхему напряжение питания от источника питания G, соответствующие мощности микросхемы при повышенной рабочей температуре согласно ТУ для испытания на безотказность.

Примечание – Допускается для нетепловыделяющих микросхем (по ГОСТ 21126) устанавливать мощность свыше номинальной с целью получения перегрева кристалла, достаточного для измерений (не менее 5 °С). При этом не должна быть нарушена работоспособность микросхемы.

Выдерживают микросхему в электрическом режиме в течение времени, достаточного для достижения установившегося значения температуры корпуса.

Заносят в протокол измерений показания температуры точки кристалла по показаниям измерителя PV2, значение тока потребления  $I_{по}$  по показаниям милливольтамперметраРА и напряжение питания микросхемы  $U_{по}$  по показаниям комбинированного цифрового прибора PV1.

С помощью устройства контроля и регулирования температуры А6 снижают температуру теплоотвода, добиваясь по показаниямPV2 возврата температуры точки кристалла микросхемы к первоначальному значению.

Заносят в протокол измерений значение температуры корпуса микросхемы  $T_{K2}$ .

Проводят повторные измерения 2 -5 раз.

Проводят измерения для остальных микросхем.

Допускается в технически обоснованных случаях (большое значение мощности, рассеиваемой микросхемой, и в других) первое измерение

					МД- 02069964 – 11.04.04 – 11 – 19	Лист
						16
Изм.	Лист	№ док-м	Подпись	Дата		



температуры корпуса проводить с подачей электрического режима на микросхему при мощности ниже номинального значения.

### 1.1.3 Обработка результатов измерений и показатели точности измерений

Рассчитывают мощность рассеяния микросхемы  $P_j$  в ваттах по формуле:

$$P_j = I_j * U_j, \quad (1.1)$$

где  $j$  – номер наблюдения.

Рассчитывают теплового сопротивление кристалл – корпус  $R_{T,ПК}$  микросхемы в градусах на ватт по формулам:

$$R_{T,ПКj} = \frac{T_{K1j} - T_{K2j}}{P_j}, \quad (1.2)$$

$$R_{T,ПК} = \frac{\sum_{j=1}^m R_{TjПК}}{m}, \quad (1.3)$$

где  $T_{K1j}$  – значение температуры корпуса микросхемы, равное повышенной рабочей температуры по ТУ;

$T_{K2j}$  – значение температуры корпуса микросхемы при подаче электрического режима и выполнения условия  $T_{nj} = T_{KI}$ ;

$T_{nj}$  – температура кристалла микросхемы;

$P$  – мощность микросхемы.

Погрешность измерения теплового сопротивления не превышает 10% с доверительной вероятностью 0,95.

					МД– 02069964 – 11.04.04 – 11 – 19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		17

## 1.2 Методопределения теплового сопротивления с контролем температуры кристалла по термочувствительному параметру

Метод основан на контроле температуры кристалла по изменению термочувствительного параметра (ТЧП) при рассеянии в кристалле электрической мощности, одновременно измеряется температура корпуса (при измерении теплового сопротивления кристалл-корпус) или температура окружающей среды (при измерении теплового сопротивления кристалл-среда).

Метод устанавливает два способа определения теплового сопротивления:

- способ постоянной температуры кристалла;
- способ измерения при двух значениях мощности и температуры.

### 1.2.1 Принцип и условия измерений

В качестве термочувствительного параметра для измерения температуры кристалла микросхем используют прямое или обратное напряжение  $p$ - $n$  перехода одного из охранных диодов для активного элемента структуры с максимальным значением рассеиваемой мощности.

Датчик температуры и источник тепла выбирают исходя из электрической схемы микросхемы и метода измерений.

При равномерном распределении источников тепла по кристаллу в качестве ТЧП следует использовать прямое напряжение  $p$ - $n$  перехода охранного диода.

При локальном выделении тепла – ТЧП элементов с максимальным значением коммутируемой мощности.

Схему включения выбирают исходя их электрического режима, в котором работает микросхема при испытаниях на безотказность.

					МД– 02069964 – 11.04.04 – 11 – 19	Лист
						18
Изм.	Лист	№ док-м	Подпись	Дата		

Для способа постоянной температуры кристалла изменение ТЧП, вызванное изменением мощности при переключении режима работы, компенсируют повышением температуры теплоотода так, что ТЧП возвращается к начальному значению.

Для способа двух значений мощности и температуры измерение ТЧП проводят при двух уровнях мощности, рассеиваемой и выбранном источнике тепла и двух значений температуры теплоотода.

### 1.2.2 Способ постоянной температуры кристалла

Измерения следует проводить на установке, структурная схема которой приведена на рисунке 1.2.



Рисунок 1.2 — Структурная схема установки

Назначение элементов аппаратуры и требования к ним.

Коммутатор А4 должен обеспечивать задержку строб-импульса измерительного тока относительно заднего фронта импульса мощности в

пределах от 2 до 200 мкс. Длительность строб-импульса 10 мкс ± 20%. Период запуска от сети – 10 мс, от внутреннего генератора 1 мс.

Блок контроля теплового сопротивления А5 должен обеспечивать измерение приращения ТЧП в диапазоне 0.1 – 5 В с погрешностью измерения не более 0.5 мВ при  $U_p = 5$  мВ и 10 мВ при  $U_p = 150$  мВ; токопотребление микросхемы – в пределах (0.1 – 0.5) А.

Вольтметр PV1, предназначенный для измерения напряжения питания и приращения измерения ТЧП, должен иметь входное сопротивление не менее 1 МОм и класс точности не хуже 0.5.

Миллиамперметр РА должен иметь внутреннее сопротивление не более 50 Ом класс точности не хуже 0.5.

Подготовка к измерениям.

Подготавливают к работе и включают измерительные приборы в соответствии с эксплуатационной документацией, переключатель блока А5 в положении “Импульсный”.

Закрепляют микросхему А1 в контактирующем устройстве на теплоотводе А2.

Примечание – Для микросхем, загерметизированных в корпусах с металлическим основанием или имеющих на внешней стороне основания шину металлизации, необходимо нанести на монтажную поверхность теплоотвода более толстый слой пасты во избежание электрического контакта корпуса с термопреобразователем.

Устанавливают с помощью ротаметра расход воздуха через теплоотвод в пределах 4 – 6 м<sup>3</sup>/час.

Оценивают приращение температуры теплоотвода из соотношения:

$$\Delta T = \Delta U_{\text{ТМИН}} / K_T, \quad (1.4)$$

где  $K_T$  – ожидаемое значение температурного коэффициента напряжения (ТКН);

					МД– 02069964 – 11.04.04 – 11 – 19	Лист
						20
Изм.	Лист	№ док-м	Подпись	Дата		

$\Delta U_{\text{ТМИН}}$  – минимальное значение приращения ТЧП.

Примечание – Рекомендуемые значения  $\Delta U_{\text{ТМИН}} = 10$  мВ,  $K_{T=2} = 2,5$  мВ/°С.

Выбирают измерительный ток  $I_{\text{изм}} = 0,2 \dots 1$  мА.

Выбирают время задержки измерения ТЧП, необходимое для полного затухания электрических переходных процессов после переключения режимов разогрева и измерения. Критерий выбора – стабильность, показаний  $U_T$ . Рекомендуемое значение времени задержки (10 – 50) мкс.

Проведение измерений

Подают на микросхему напряжение питания, согласно ТУ, и устанавливают температуру корпуса (теплоотвода) или термокамеры, равной:

$$T_{K1} = T_{\text{КПОВ}} - \Delta T, \quad (1.5)$$

где  $T_{\text{КПОВ}}$  – повышенная температура корпуса или среды по ТУ.

Выдерживают микросхему в течение времени, достаточном для достижения установившегося значения температуры корпуса(среды).

Измеряют ток потребления  $I_I$  и напряжение питания  $U_I$  по показаниям миллиамперметра РА и цифрового прибора PV1, вычисляют мощность  $P_1$  и заносят в протокол измерений.

Измеряют напряжение  $U_T$  ТЧП по показаниям PV и заносят в протокол измерений.

Заносят в проток измерений температуру корпуса (среды) по показаниям цифрового измерителя температуры PV2.

С помощью устройства контроля и регулирования температуры (регулятора термокамеры) А6 повышают температуру теплообменника до повышенной рабочей температуры и одновременно снижают напряжение питания добиваясь возврата  $U_{TK}$  начальному значению.

					МД– 02069964 – 11.04.04 – 11 – 19	Лист
Изм.	Лист	№ док-м	Подпись	Дата		21

Заносят в протокол измерений значение температуры корпуса  $T_2$  (среды) по показаниям измерителя PV2, значение тока потребления  $I_2$  по показаниям милливольтметра РА и напряжение питания микросхемы  $U_2$  по показаниям цифрового прибора PV1.

Вычисляют значение потребляемой мощности  $P_2$  и заносят в протокол измерений.

Проводя повторные измерения 2 -5 раз.

Проводят измерения для остальных микросхем.

Обработка результатов измерений.

Рассчитывают значения рассеиваемой мощности  $P_{1j}$  и  $P_{2j}$  в ваттах по формулам:

$$R_{Tj,ПК} = \frac{T_{K2j} - T_{K1j}}{P_{1j} - P_{2j}}, \quad (1.6)$$

$$R_{T,ПК} = \frac{\sum_{j=1}^m R_{Tj,ПК}}{m}. \quad (1.7)$$

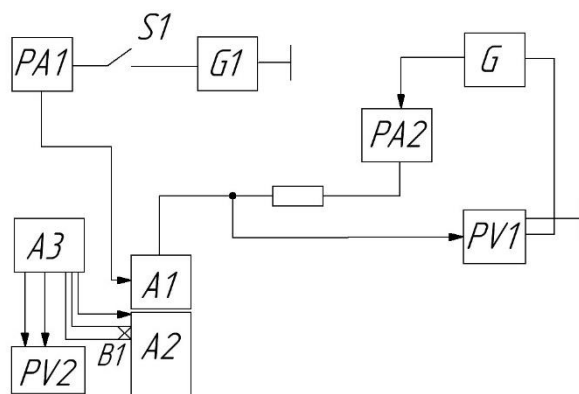
Погрешность измерения теплового сопротивления не превышает 15% с доверительной вероятностью 0,95.

### 1.2.3 Способ определения при двух значениях мощности и температуры

Измерения теплового сопротивления производят в статическом режиме разогрева, измеряя величину ТЧП при двух значениях мощности, рассеиваемой микросхемой. Для определения температурного коэффициента ТЧП измерения проводят при двух значениях температуры корпуса.

Измерение следует проводить на установке структурная схема которой приведена на рисунке 1.3, требования к аппаратуре согласно п.1.2.2

					МД– 02069964 – 11.04.04 – 11 – 19	Лист
Изм.	Лист	№ док-м	Подпись	Дата		22



A1 - микросхема;  
 A2 - термостатируемый теплоотвод  
 с нагревателем;  
 A3 - устройство контроля  
 и регулирования температуры;  
 PA1, PA1 - амперметры;  
 PV1 - вольтметр;  
 PV2 - цифровой измеритель температуры;  
 G1, G2 - источники постоянного тока;  
 B1 - термопара ТХК;  
 S1 - переключатель.

Рисунок 1.3 — Структурная схема установки

Подготовка измерениям.

Подготовка к измерениям в соответствии с п. 1.2.2. Ключ S1- разомкнут.

Проведение измерений.

С помощью устройства контроля и регулирования температуры А3 устанавливают температуру теплоотвода на (20-30) °С ниже значения повышенной рабочей температуры корпуса согласно ТУ на микросхему.

Подают на микросхему напряжение питания согласно ТУ.

Выдерживают микросхему под электрической нагрузкой до достижения стабильности показаний вольтметра PV1.

Измеряют значение тока по показаниям PA2, величину ТЧП по показаниям PV1 и температуру корпуса по показаниям PV2. Вычисляют мощность  $P_1$ .

Значения  $I_1(P_1)$ ,  $U_T(P_1)$ ,  $T_{КП}$ ,  $P_1$  заносят в протокол измерений.

Замыкают ключ S1 и после прекращения изменений ТЧП измеряют значения  $I_1(P_2)$ ,  $U_{T1}(P_2)$ ,  $P_2$  и заносят в протокол измерений.

С помощью устройства контроля и регулирования температуры А3 устанавливают температуру теплоотвода, равной повышенной рабочей температура по ТУ.

Повторяют измерения  $I_2(P_1)$ ,  $U_{T2}(P_2)$ ,  $P_2$ ,  $I_2(P_2)$ ,  $U_{T2}(P_2)$ ,  $T_{K2}$ ,  $P_1$ ,  $P_2$  и заносят в протокол измерений.

Проводят повторные измерения 2 - 5 раз.

Проводят измерения для остальных микросхем.

Обработка результатов измерений

Рассчитывают тепловое сопротивление в градусах на ватт по формулам:

$$R_{T1,ПК} = \frac{U_{T11} - U_{T12}}{K_T \cdot \Delta P}, \quad (1.8)$$

$$R_{T2,ПК} = \frac{U_{T21} - U_{T22}}{K_T \cdot \Delta P}, \quad (1.9)$$

$$\text{где } K_T = \frac{U_{T11} - U_{T21}}{\Delta T} = \frac{U_{T12} - U_{T22}}{\Delta T} \text{ (мВ/}^\circ\text{C)}, \quad (1.10)$$

$$\Delta P = P_{11} - P_{21} = P_{12} - P_{22} \text{ (Вт)}, \quad (1.11)$$

$$\Delta T = T_{K2} - T_{K1}. \quad (1.12)$$

Погрешность теплового сопротивления не превышает 17% с доверительной вероятностью 0,95.

### 1.3 Выводы

Рассмотрены метод 2 – метод определения теплового сопротивления с контролем температуры кристалла с помощью термоэлектрического преобразователя. и метод 3 – метод определения теплового сопротивления с контролем температуры кристалла по термочувствительному параметру, способ постоянной температуры кристалла.



Метод 1 не рассматривался, т.к. в [9] сказано, что данный метод изложен в ОСТ 11 073.073-82. Данный ОСТ в библиотеке университета утерян, а в сети Internet найти его не удалось.

Метод 3 – метод определения теплового сопротивления с контролем температуры кристалла по термочувствительному параметру, способ определения при двух значениях мощности и температуры не рассматривался, т.к. в формулу расчета теплового сопротивления по этому способу входит ТКН, а он зависит от тока.

					МД– 02069964 – 11.04.04 – 11 – 19	Лист
						25
Изм.	Лист	№ док-м	Подпись	Дата		

## 2 Определение теплового сопротивления микросхем на основе моделирования в среде TCAD

Для определения режимов испытания микросхем при определении их теплового сопротивления было проведено моделирование в среде TCAD. В качестве объекта моделирования была выбрана микросхема 124КТ1 производства АО «Орбита» (г. Саранск).

### 2.1 Назначение, конструкция и основные параметры микросхемы 124КТ1

Микросхема 124КТ1 предназначена для использования в качестве последовательного интегрального прерывателя.

Схема электрическая принципиальная микросхемы 124КТ1 показана на рисунке 2.1 и состоит из двух р-п-р транзисторов. Как видно, микросхема содержит всего два одинаковых элемента, поэтому можно создать модель всего кристалла микросхемы, при этом количество элементов сетки модели кристалла не будет чрезмерно большим.

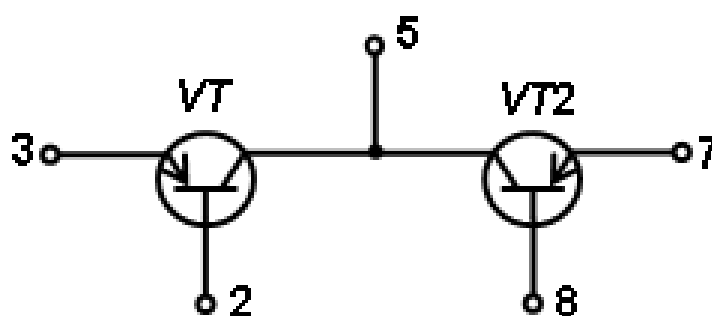


Рисунок 2.1 – Схема электрическая принципиальная микросхемы 124КТ1

Микросхема выпускается в корпусе 301.8-2. Чертеж корпуса микросхемы показан на рисунке 2.2.

					МД – 02069964 – 11.04.04 – 11 – 19	Лист
						26
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата		

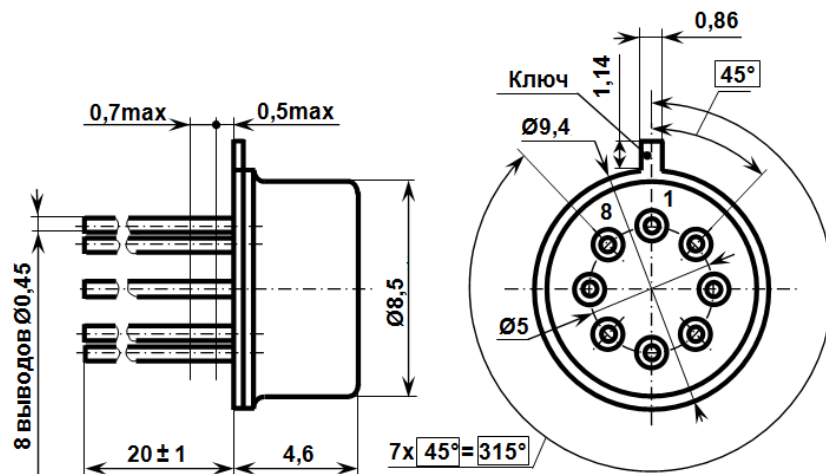
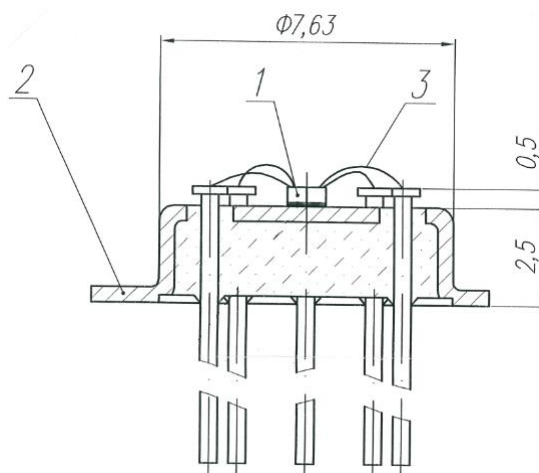


Рисунок 2.2 – Корпус микросхемы 124КТ1

Сечение корпуса микросхемы 124КТ1 с кристаллом показано на рисунке 2.3.



- 1 – кристалл;
- 2 – корпус;
- 3 – проволока.

Рисунок 2.3 – Сечение корпуса микросхемы 124КТ1 с кристаллом

Основные параметры микросхемы 124КТ1 представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Основные параметры микросхемы 124КТ1

Наименование параметра, единица измерения, режим измерения	Буквенное обозначение	Норма	
		не менее	не более
Ток коллектора, мА	$I_K$	-	25
Прямое напряжение на переходах коллектор-база, В при $I_{упр} = 2$ мА	$U_{КБ пр}$	-	0,85
Обратное напряжение коллектор- база, В	$U_{КБ0}$	-	20
Обратное напряжение эмиттер- база, В	$U_{ЭБ0}$	-	30
Сопротивление в открытом состоянии, Ом при $I_{ком} = 100$ мкА; $I_{упр} = 2,0$ мА	$R_{отк}$	-	100

## 2.2 Разработка командного файла для создания модели микросхемы 124КТ1

Текст командного файла для создания модели микросхемы 124КТ1 в программе Structure Editor [18] приведен в приложении А.

Этот командный файл описывает процесс создания модели микросхемы 124КТ1. Модель состоит из кристалла 800×800×400 мкм и корпуса из ковара (см. рисунок 2 и 3). Для упрощения выводы корпуса не создавались.

Команды ниже строки

;--- 3D structure

описывают создание прямоугольного полупроводникового кристалла и корпуса микросхемы.

Команды ниже строки

;--- Contacts

описывают создание контактов. Создается пять электрических контактов на кристалле: коллектора (Collector), два базовых (Base1 и Base2) и два

эмиттерных (Emitter1 и Emitter2) и термоконтакт (Collector\_thermo), который наносится на всю внешнюю поверхность корпуса микросхемы.

Команды ниже строки

;--- Constsnt Profile

задают профили легирования областей кристалла микросхемы.

Команды ниже строки

;--- Constsnt Profile sub

задают профиль легирования подложки с постоянной концентрацией р-типа, легированный бором ("BoronActiveConcentration ") с концентрацией  $1.5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  ( $1.5e15$ ) и толщиной 393 мкм.

Команды ниже строки

;--- Meshing Strategy sub

задают максимальные и минимальные размеры элементов сетки по осям X, Y и Z для подложки.

Команды ниже строки

;--- Constsnt Profile n

задают профиль легирования эпитаксиальной пленки с постоянной концентрацией n-типа, легированный бором ("PhosphorusActiveConcentration ") с концентрацией  $4.8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  ( $4.8e15$ ) и толщиной 7 мкм.

Команды ниже строки

;--- Meshing Strategy n

задают максимальные и минимальные размеры элементов сетки по осям X, Y и Z для эпитаксиальной пленки.

Команды ниже строки

;--- Analytical Profiles

задают параметры профилей легирования областей коллектора, баз и эмиттеров.

Команды ниже строки

;--- emit1 profile

					МД – 02069964 – 11.04.04 – 11 – 19	Лист
						29
Изм.	Лист	№ док-м	Подпись	Дата		

и

```
--- emit2 profile
```

задают координаты расположения областей змиттеров.

Команды ниже строки

```
--- base1 profile
```

и

```
--- base2 profile
```

задают координаты расположения областей баз.

Команды ниже строки

```
--- coll profile
```

и

```
--- coll2 profile
```

задают координаты расположения областей коллектора.

Последняя команда

```
(sde:build-mesh "n@node@")
```

осуществляет построение сетки.

На рисунке 2.4 показан общий вид модели кристалла микросхемы 124КТ1 с основанием корпуса.

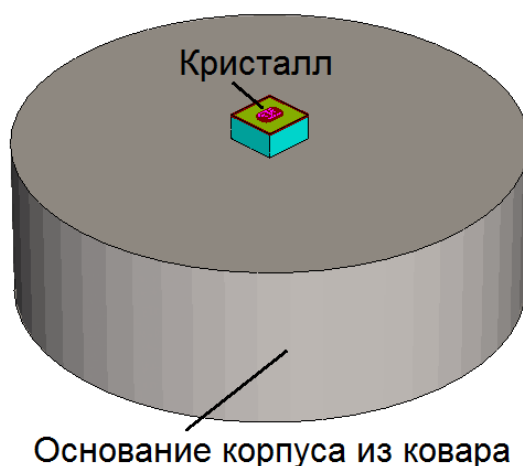


Рисунок 2.4 — Общий вид модели кристалла микросхемы с основанием корпуса

На рисунке 2.5 показан вид модели кристалла микросхемы с крышкой и с основанием корпуса в сечении.

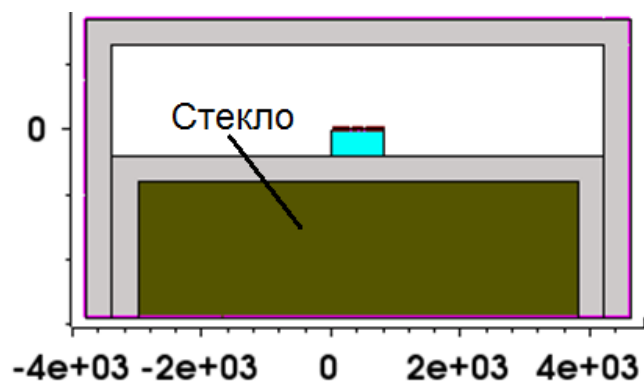


Рисунок 2.5 — Модель кристалла микросхемы с крышкой и с основанием корпуса в сечении

На рисунке 2.6 показана модель кристалла. Размеры кристалла  $800 \times 800 \times 400$  мкм.

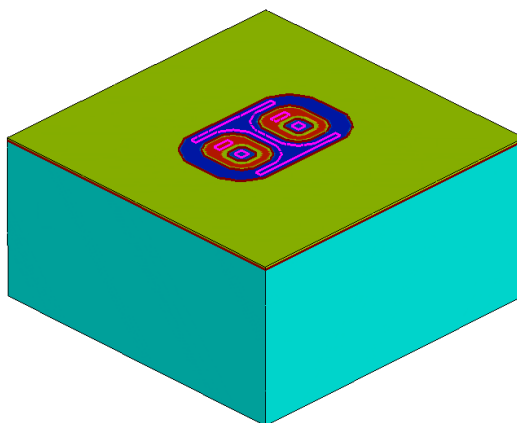


Рисунок 2.6 — Модель кристалла микросхемы

Распределение концентрации легирующей примеси в верхней части кристалла в области  $p-n$  перехода коллектор-база транзисторов показано на рисунке 2.7. На этом же рисунке указаны базовой, эмиттерный и коллекторный

контакты и показана цветовая палитра распределения концентрации легирующей примеси в  $\text{см}^{-3}$ .

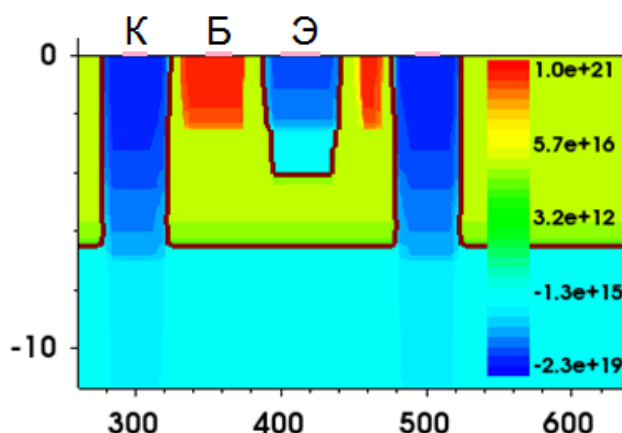


Рисунок 2.7 — Распределение концентрации примеси в верхней части кристалла в области  $p-n$  перехода коллектор-база транзисторов

### 2.3 Моделирование микросхемы 124КТ1 при определении теплового сопротивления методом 2

Ниже коротко изложена методика проведения измерений для определения теплового сопротивления микросхем методом 2.

1 Устанавливают температуру корпуса, равной повышенной рабочей температуре, и выдерживают микросхему в течение времени, достаточного для достижения установившегося значения температуры корпуса.

2 Измеряют температуру выбранной точки кристалла микросхемы и температуру корпуса  $T_{к1}$ .

3 Подают на микросхему напряжение питания, соответствующие мощности микросхемы при повышенной рабочей температуре.

4 Выдерживают микросхему в электрическом режиме в течение времени, достаточного для достижения установившегося значения температуры корпуса.

5 Измеряют температуру точки кристалла, значение тока потребления  $I$  и падение напряжения на  $p-n$  переходе коллектор база  $U$ .



6 Снижают температуру корпуса, добиваясь возврата температуры точки кристалла микросхемы к первоначальному значению.

7 Измеряют температуру корпуса микросхемы  $T_{K2}$ .

8 Рассчитывают мощность рассеяния микросхемы:

$$P = I \cdot U. \quad (2.1)$$

9 Рассчитывают тепловое сопротивление кристалл-корпус микросхемы:

$$R_{T,ПК} = \frac{T_{K1} - T_{K2}}{P}. \quad (2.2)$$

На рисунке 2.8 представлены временные диаграммы тока, падения напряжения на  $p-n$  переходе коллектор-база транзисторов микросхемы и изменение температуры корпуса и максимальной температуры кристалла микросхемы.

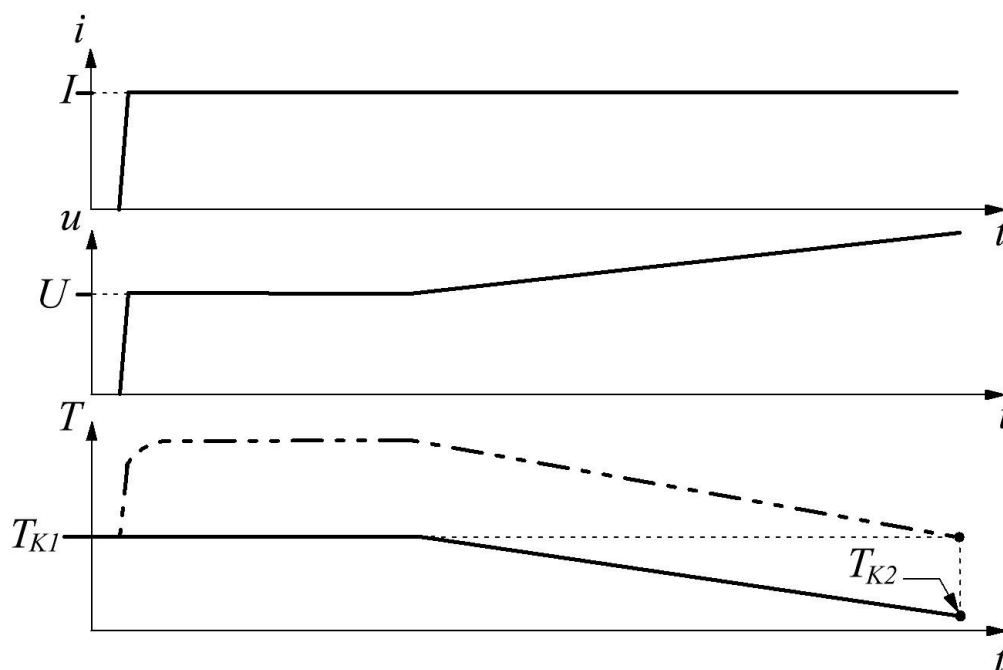


Рисунок 2.8 — Временные диаграммы

Моделирование проводилось при следующих условиях:

- транзисторы в диодном включении на переходе коллектор-база;
- повышенная рабочая температура  $T_{KI} = 125$  °С;
- амплитуда тока  $I = 100$  мА.

В соответствии с этой методикой проведения измерений был разработан командный файл для моделирования в среде TCAD.

При моделировании нужно учитывать эффекты высокого уровня инжекции и влияние концентрации легирующей примеси на электрофизические параметры полупроводниковой структуры, а также саморазогрев структуры от протекающего прямого тока. Подробное описание этих эффектов приведено в [7]. Текст командного файла для программы Sentaurus Device [17], с помощью которой проводится моделирование, приведен в приложении Б.

Далее приведено описание разделов и основных команд командного файла.

Device KT124 {...} – задает имя модели микросхемы 124КТ1.

В разделе Electrode определяются все электроды, используемые при моделировании микросхемы, с соответствующими граничными условиями и начальными смещениями.

В разделе File указываются входные файлы, описывающие структуру модели микросхемы и параметры материалов, и выходные файлы, в которых сохраняются результаты расчета.

В разделе Plot указываются все расчетные переменные, которые необходимо сохранить в выходном графическом файле. Переменные в этом разделе имеют следующий смысл:

Doping – распределение разностной концентрации примеси;

eQuasiFermi hQuasiFermi – распределение квазипотенциала Ферми для электронов и дырок соответственно;

eDensity hDensity – распределение плотности электронов и дырок соответственно;

Current eCurrent hCurrent – распределение полного, электронного и дырочного тока соответственно;

eMobility hMobility – распределение подвижности электронов и дырок соответственно;

eLifetime hLifetime – распределение времени жизни электронов и дырок соответственно;

Temperature – распределение температуры.

В разделе Physics определяются физические модели и эффекты, используемые при моделировании:

Thermodynamic – включает термодинамическую модель;

EffectiveIntrinsicDensity ( BandGapNarrowing (OldSlotboom) ) – модель сужения ширины запрещенной зоны кремния;

Mobility – модели подвижности:

DopingDep – модель зависимости подвижности от концентрации легирующей примеси;

HighFieldSaturation – модель подвижности, учитывающая эффекты насыщения в сильных полях;

CarrierCarrierScattering – модель электронно-дырочного рассеяния.

Recombination – модели генерации-рекомбинации:

SRH (DopingDep TempDep) – модель рекомбинации Шокли-Рида-Холла;

Auger – модель Оже-рекомбинации;

В разделе Math производится расчет уравнений полупроводниковых приборов методом последовательных итераций на дискретной сетке. На каждой итерации вычисляется ошибка, и программа производит проверку сходимости расчета, критерием которого является минимальная допустимая ошибка.

В разделе System определяется список соединений физических приборов (в данном случае физико-топологическая модель микросхемы 124KT1) и

					МД – 02069964 – 11.04.04 – 11 – 19	Лист
						35
Изм.	Лист	№ док.им.	Подпись	Дата		

элементов схемы (Spice-модели), подлежащих моделированию. Связи в этом списке определяются через узлы схемы.

Isource\_pset Iheat1 (0 1) { pwl=(0 0 1u 100m 105 100m) } – источник греющего тока, подключаемый к узлу (1) относительно общего узла (0).

KT124 VT1 (Collector=1 Base1=0 Base2=0 Emitter1=0 Emitter2=0) – модель микросхемы, подключаемая эмиттерами и базами к общему узлу (0), коллектором к узлу (1).

В разделе Solve определяется последовательность расчетов, которая должна быть выполнена при моделировании.

Poisson – определяет начальное приближение только для решения уравнения Пуассона. Условия начальных электрических смещений на электродах те же самые, что заданы в разделе Electrode.

Coupled { Poisson Electron Hole Contact Circuit } – уравнение непрерывности для электронного и дырочного тока рассчитывается вместе с уравнением Пуассона, решение которого в предыдущем шаге берется как начальное приближение. Ключевое слово Circuit управляет разрешением (разрешающей способностью) моделей и узлов электрической схемы. Ключевое слово Contact управляет разрешением условий электрических границ раздела у контактов.

Далее командой Transient проводится термодинамическое моделирование переходного процесса в течение 115 секунд.

В результате моделирования были получены следующие параметры:

- падение напряжение на  $p-n$  переходе коллектор база  $U = 0,918$  В;
- температура корпуса микросхемы  $T_{K2} = 118,8$  °С.

На основе полученных результатов по формуле (2.1) рассчитана выделяемая мощность  $P = 0,0918$  Вт в структуре и по формуле (2.2) определено тепловое сопротивление переход-корпус микросхемы 124КТ1:

					МД – 02069964 – 11.04.04 – 11 – 19	Лист
						36
Изм.	Лист	№ док-м	Подпись	Дата		

## 2.4 Моделирование микросхемы 124КТ1 при определении теплового сопротивления методом 3, способ постоянной температуры

Ниже коротко изложена методика проведения измерений для определения теплового сопротивления микросхем методом 3, способ постоянной температуры.

1 Устанавливают температуру корпуса, равной:

(2.3)

где  $T_{КПОВ}$  — повышенная температура корпуса по ТУ,

$\Delta T$  — приращение температуры корпуса.

Выдерживают микросхему в течение времени, достаточного для достижения установившегося значения температуры корпуса.

2 Подают на микросхему первый мощный импульс греющего тока, измеряют ток  $I_1$  и падение напряжения  $U_1$  по показаниям амперметра РА и вольтметра РV1 и вычисляют мощность  $P_1$ :

(2.4)

3 Подают на микросхему первый измерительный импульс тока и измеряют напряжение  $U_T$  ТЧП по показанию вольтметра РV1 и температуру корпуса по показанию измерителя температуры РV2.

4 Повышают температуру корпуса до повышенной рабочей температуры  $T_{КПОВ}$  и одновременно подают серию импульсов, состоящую из маломощных импульсов греющего тока и импульсов измерительного тока, добиваясь возврата  $U_T$  к начальному значению (значению, измеренному на первом измерительном импульсе).

					МД – 02069964 – 11.04.04 – 11 – 19	Лист
						37
Изм.	Лист	№ док-м	Подпись	Дата		

5 Измеряют температуру корпуса  $T_{K2}$  по показанию измерителя температуры PV2, ток  $I_2$  и падение напряжения  $U_2$  по показаниям амперметра РА и вольтметра PV1, и рассчитывают мощность  $P_2$ :

(2.5)

6 Рассчитывают тепловое сопротивление кристалл-корпус микросхемы:

(2.6)

Начальное значение температуры корпуса  $T_{K1}$  определяется согласно [9] по формуле:

$$T_{K1} = T_{KПОВ} - \Delta T, \quad (2.7)$$

где  $T_{KПОВ}$  — повышенная температура корпуса по ТУ (125 °С),  $\Delta T$  — приращение температуры корпуса.

$\Delta T$  определяется согласно [9] по формуле:

$$\Delta T = \Delta U_{ТМИН} / K_T, \quad (2.8)$$

где  $\Delta U_{ТМИН}$  — минимальное значения приращение ТЧП,  $K_T$  — значение температурного коэффициента напряжения (ТКН).

При измерительном токе  $I_{изм} = 1$  мА ТКН для микросхемы 124КТ1 равен 2 мВ/°С. Рекомендуемое значение  $\Delta U_{ТМИН} = 10$  мВ [9], тогда по формуле 2.8  $\Delta T = 5$  °С и по формуле 2.7  $T_{K1} = 120$  °С.

На рисунке 2.9 представлены временные диаграммы импульсов греющих и измерительных токов, падений напряжения на  $p-n$  переходе коллектор-база

					МД – 02069964 – 11.04.04 – 11 – 19	Лист
						38
Изм.	Лист	№ док-м	Подпись	Дата		

транзисторов микросхемы и изменение температуры корпуса микросхемы.

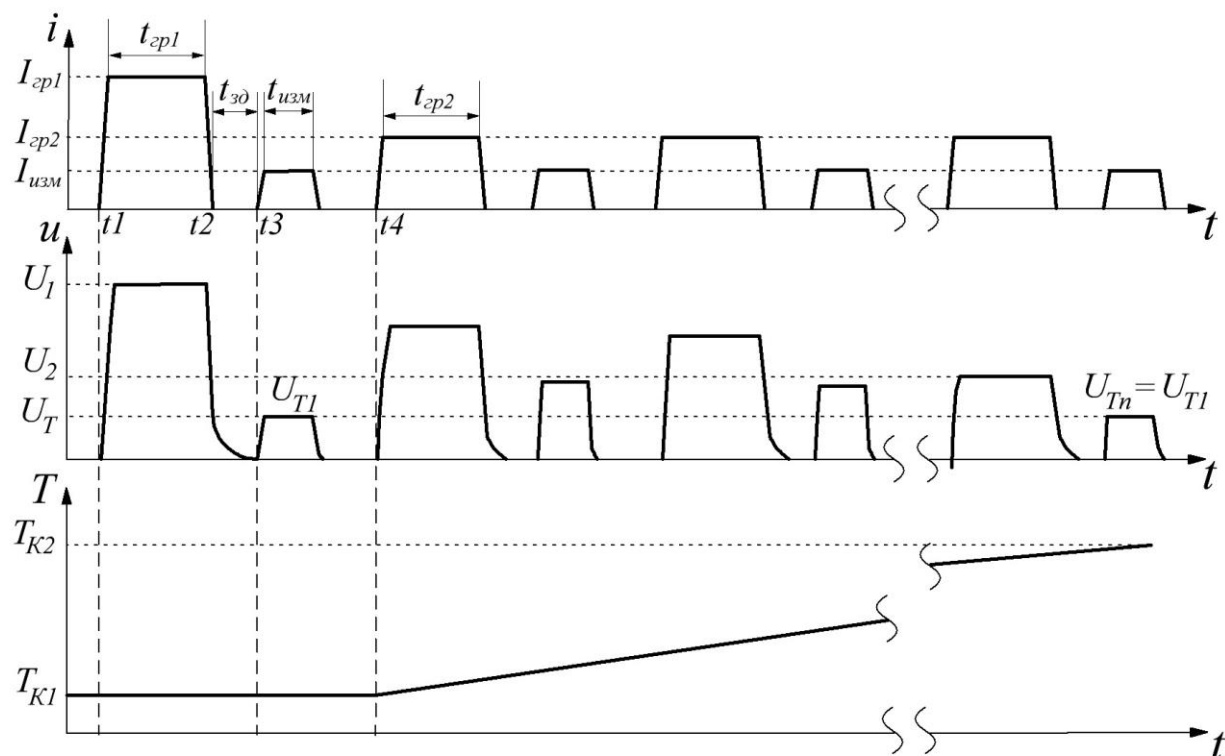


Рисунок 2.9 — Временные диаграммы

Импульсы греющего тока состоят из первого мощного импульса греющего тока  $I_{cp1}$  (интервал времени  $t1-t2$ ) и из последовательности маломощных импульсов греющего тока  $I_{cp2}$  (с момента времени  $t4$ ). Длительность импульсов греющего тока  $t_{эп1} = t_{эп2} = 5$  с. Амплитуда  $I_{cp1} = 100$  мА,  $I_{cp2} = 3$  мА. После каждого импульса греющего тока следует импульс измерительного тока  $I_{изм}$  с амплитудой 1 мА. Время задержки  $t_{зд}$  следования импульсов измерительного тока после окончания каждого импульса греющего тока выбирается из рекомендованного в [9] диапазона значений от 2 до 200 мкс. Во время прохождения первого импульса с амплитудой  $I_{cp1}$  измеряется падение напряжения на  $p-n$  переходе коллектор-база  $U_1$ . С помощью импульсов  $I_{изм}$  измеряется падение напряжения на  $p-n$  переходе коллектор-база  $U_T$ .

Начиная с момента времени  $t_4$ , повышают температуру корпуса микросхемы до повышенной рабочей температуры, добиваясь возврата  $U_T$  к первоначальному значению ( $U_{Tn} = U_{Ti}$ ). При этом температура корпуса микросхемы  $T_K = T_{K2}$ .

Моделирование проводилось при следующих условиях.

Транзисторы в диодном включении на переходе коллектор-база.

Термочувствительный параметр (ТЧП) – прямое напряжение перехода коллектор-база транзисторов.

Исходная температура  $T_{K1} = 125 - 5 = 120$  °С.

Амплитуда первого мощного импульса греющего тока  $I = 100$  мА. Длительность  $t = 5$  с.

Амплитуда второго и последующих маломощных импульсов греющего тока  $I = 3$  мА. Длительность  $t = 5$  с.

Амплитуда импульсов измерительного тока  $I = 1$  мА. Длительность  $t = 10$  мкс.

Задержка импульсов измерительного тока относительно заднего фронта импульсов греющего тока  $t_{30} = 20$  мкс.

Интервал времени между окончанием первого мощного импульса греющего тока  $I_{зр1}$  и началом первого маломощного импульса греющего тока  $I_{зр2}$  10 с.

В соответствии с этой методикой проведения измерений был разработан командный файл для моделирования в среде TCAD. Текст этого командного файла отличается от текста командного файла для моделирования по методу 2 (см. подраздел 2.2) только разделом System.

Isourc\_pset Iheat1 (0 1) { pwl=(0 0 1u 100m 5 100m 5.000001 0) } – источник первого мощного импульса греющего тока, подключаемый к узлу (1) относительно общего узла (0).

					МД – 02069964 – 11.04.04 – 11 – 19	Лист
						40
Изм.	Лист	№ док-м	Подпись	Дата		



Isource\_pset Imeasure1 (0 1) { pwl=(0 0 5.000021 0 5.000022 1m 5.000032 1m 5.000033 0) } – источник первого импульса измерительного тока, подключаемый к узлу (1) относительно общего узла (0).

Isource\_pset Iheat2 (0 1) { pulse=(0 3m 15.0001 1u 1u 5 5.0001) } – источник последующих маломощных импульсов греющего тока, подключаемый к узлу (1) относительно общего узла (0).

Isource\_pset Imeasure2 (0 1) { pulse=(0 1m 20.000122 1u 1u 10u 5.0001) } – источник последующих импульсов измерительного тока, подключаемый к узлу (1) относительно общего узла (0).

По результатам проведенного моделирования было рассчитано значение мощности по формуле (2.4) во время прохождения импульса  $I_{sp1}$ , которое составило  $P_1 = 94,2$  мВт и значение мощности по формуле (2.5) во время прохождения импульса  $I_{sp2}$ , которое составило  $P_2 = 1,5$  мВт. На основании полученных результатов по формуле (2.6) было определено тепловое сопротивление переход-корпус микросхемы 124КТ1 при времени задержки  $t_{зд} = 20$  мкс.

Полученные результаты отображены в таблице 2.2. Также в этой таблице представлены результаты расчетов теплового сопротивления переход-корпус, полученные в результате испытаний, проведенных на АО «ПКК Миландр».

Таблица 2.2 — Значения теплового сопротивления

	$T_{K1}$ , °C	$I_1$ , А	$U_1$ , В	$T_{K2}$ , °C	$I_2$ , А	$U_2$ , В	$P_1$ , Вт	$P_2$ , Вт	$R_{T,ПК}$ , °C/Вт
Моделирование	122	0,09	0,879	126,5	0,002	0,464	0,079	0,001	57,7
Измерения	122,4	0,09	0,850	126,7	0,002	0,519	0,077	0,001	56,2

Далее для определения оптимального времени задержки  $t_{30}$  было проведено моделирование электрических и тепловых процессов, происходящих в микросхеме при испытаниях при разных временах задержки.

По результатам проведенного моделирования были получены значения температуры корпуса  $T_{K2}$  при разных значениях времени задержки  $t_{30}$ . Для выявления оптимального времени задержки  $t_{30}$ , при котором погрешность при определении теплового сопротивления переход-корпус микросхемы минимальная, был проведен расчет относительной погрешности теплового сопротивления  $\delta$  в зависимости от  $t_{30}$  по формуле:

$$\delta = \frac{|R_{T,ПК} - R_{T,ПКД}|}{R_{T,ПКД}} \cdot 100\%, \quad (2.9)$$

где  $R_{T,ПКД}$  — действительное значение теплового сопротивления переход-корпус.

Полученные результаты представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 — Результаты моделирования

$t_{30}$ , мкс	$T_{KP} = T_{K2}$ , °C	$R_{T,ПК}$ , Вт/°C	$\delta$ , %
0	126,1	68,0	0
2	125,9	65,7	3,3
3	125,9	65,1	4,2
4	125,8	64,6	4,9
5	125,8	64,3	5,6
10	125,6	62,5	8,0
50	125,2	57,3	15,6
200	124,7	52,6	22,5

Как видно из таблицы, с увеличением  $t_{30}$  полученные при расчете значения  $R_{T,ПК}$  уменьшаются и погрешность  $\delta$ , соответственно, возрастает.

Понять причину увеличения погрешности позволяет график изменения максимальной температуры кристалла  $T_{KPmax}$  во времени, который приведён на рисунке 2.10.

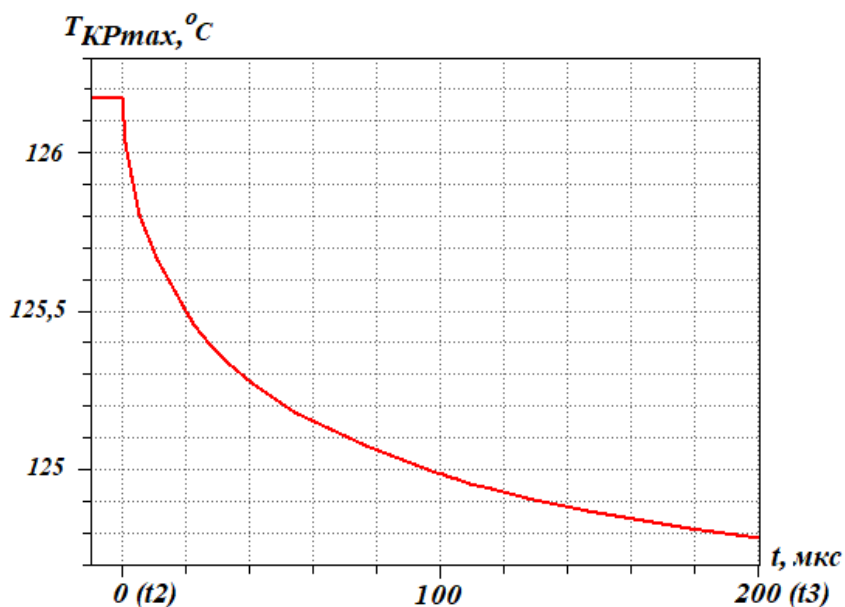


Рис. 2.10 – График изменения максимальной температуры кристалла во времени

Из графика видно, что максимальная температура в момент окончания импульса  $I_{sp1}$  достигает значения  $T_{KPmax} = 126,2$  °C и затем она достаточно быстро уменьшается, особенно на первых микросекундах. Интервал времени с  $t_2$  до  $t_3$  соответствует времени задержки  $t_{з0}$  (см. рис. 2.9).

Таким образом, при определении теплового сопротивления переход-корпус микросхемы время задержки  $t_{з0}$  следует выбирать минимально допустимым, т.е. 2 мкс.

## 2.5 Выводы

Рассмотрены назначение, конструкция и основные параметры микросхемы 124КТ1.

Разработан командный файл и создана модель микросхемы 124КТ1.

Разработаны командные файлы для моделирования микросхемы 124КТ1.

По результатам моделирования рассчитаны значения теплового сопротивления переход корпус микросхемы 124КТ1 методом 2 и методом 3, способ постоянной температуры кристалла при различных значениях времени задержки импульсов измерительного тока относительно заднего фронта импульсов греющего тока.

В результате проделанной работы были выявлены следующие преимущества и недостатки методов.

Преимущества метода 2:

- высокая точность измерений.

Преимущества метода 3 (способ постоянной температуры кристалла):

- простота измерительной установки.

Недостатки метода 2:

- сложная конструкция измерительной установки;
- проводить измерения необходимо на открытом кристалле.

Недостатки метода 3 (способ постоянной температуры кристалла):

- низкая точность измерений.

					МД – 02069964 – 11.04.04 – 11 – 19	Лист
						44
Изм.	Лист	№ док-м	Подпись	Дата		

### 3 Модифицированный метод определения теплового сопротивления

После проведённого моделирования по методу 3, способ постоянной температуры кристалла (см. подраздел 2.3), возник вопрос о необходимости подачи маломощных греющих импульсов тока и измерительных импульсов тока.

С целью упростить методику проведения измерений были рассмотрены следующие варианты:

— вариант 1, когда маломощные импульсы греющего тока не подаются на микросхему;

— вариант 2, когда маломощные импульсы греющего тока и измерительные импульсы тока не подаются, а вместо измерительных импульсов тока подаётся постоянный измерительный ток.

#### 3.1 Принцип измерения по модифицированному методу

Принцип измерения по модифицированному методу для двух вариантов следующий.

1. Устанавливают температуру корпуса, равной:

(3.1)

где  $T_{кпов}$  — повышенная температура корпуса по ТУ,

$\Delta T$  — приращение температуры корпуса, выбирают 3-5 °С.

Выдерживают микросхему в течение времени, достаточного для достижения установившегося значения температуры корпуса.

2. Подают на микросхему первый мощный импульс греющего тока, измеряют ток  $I_1$  и падение напряжения  $U_1$  по показаниям амперметра РА и вольтметра РV1 и вычисляют мощность  $P_1$ :

					МД – 02069964 – 11.04.04 – 11 – 19	Лист
						45
Изм.	Лист	№ док-м	Подпись	Дата		

(3.2)

3 Подают на микросхему первый измерительный импульс тока и измеряют напряжение  $U_T$  ТЧП по показанию вольтметра PV1 и температуру корпуса по показанию измерителя температуры PV2.

4 Повышают температуру корпуса с помощью устройства контроля и регулирования температуры А4 до повышенной рабочей температуры  $T_{КПОВ}$  и одновременно подают измерительные импульсы тока (в случае варианта 1) или постоянный измерительный ток (в случае варианта 2), добиваясь возврата  $U_T$  к начальному значению (значению, измеренному на первом измерительном импульсе).

5 Измеряют температуру корпуса  $T_{К2}$  по показанию измерителя температуры PV2.

6 Рассчитывают тепловое сопротивление кристалл-корпус микросхемы:

(3.3)

В качестве термочувствительного параметра для измерения температуры кристалла микросхем используют прямое или обратное напряжение  $p-n$  перехода одного из охранных диодов или активного элемента структуры с максимальным значением рассеиваемой мощности.

На рисунках 3.1 и 3.2 приведены временные диаграммы двух вариантов проведения измерения.

					МД – 02069964 – 11.04.04 – 11 – 19	Лист
						46
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

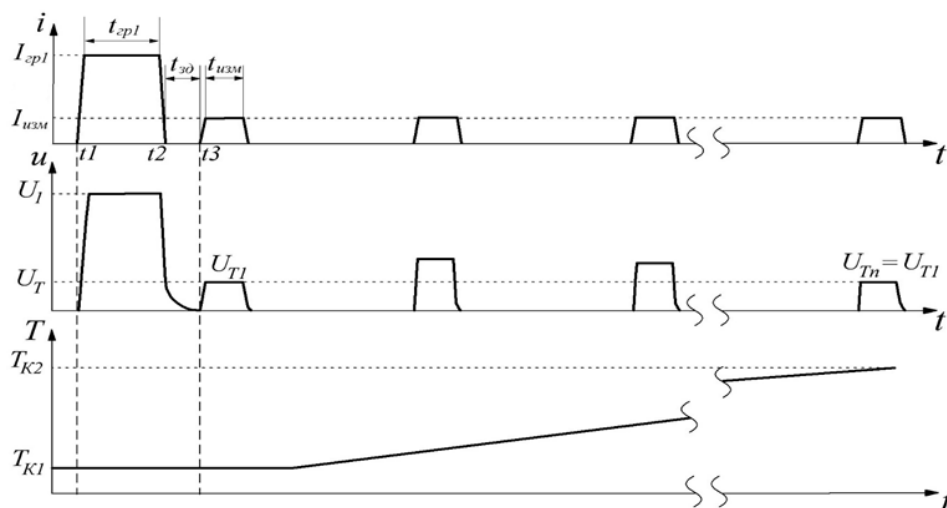


Рисунок 3.1 — Вариант 1

Отличие данного варианта от ОСТ 11 0944-96 — отсутствие маломощных импульсов греющего тока.

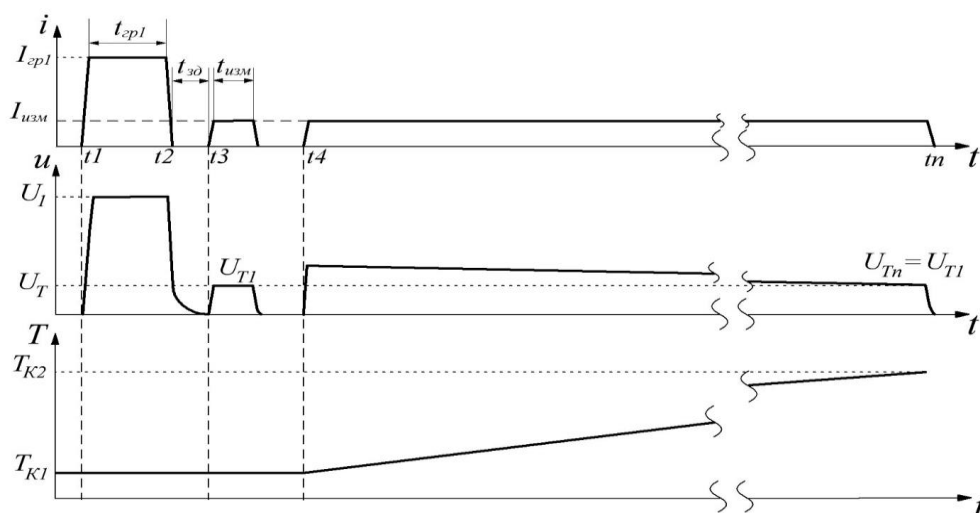


Рисунок 3.2 — Вариант 2

Отличие данного варианта от ОСТ 11 0944-96 — отсутствие маломощных импульсов греющего тока и импульсов измерительного тока. Вместо них на микросхему подаётся постоянный измерительный ток.

### 3.2 Условия и проведение моделирования варианта 1 и варианта 2

Для варианта 1 и 2 моделирование проводилось при следующих условиях.

Транзисторы в диодном включении на переходе коллектор-база.

Термочувствительный параметр (ТЧП) – прямое напряжение перехода коллектор-база транзисторов.

Исходная температура  $T_{KI} = 125 - 5 = 120$  °С.

Амплитуда первого мощного импульса греющего тока  $I = 100$  мА.  
Длительность  $t = 5$  с.

Амплитуда импульсов измерительного тока  $I = 1$  мА. Длительность  $t = 10$  мкс (для варианта 1).

Амплитуда импульсов измерительного тока  $I = 1$  мА (для варианта 2) либо постоянный измерительный ток  $I = 1$  мА (для варианта 3).

Задержка импульсов измерительного тока относительно заднего фронта импульсов греющего тока  $t_{30} = 2$  мкс.

Интервал времени между окончанием первого мощного импульса греющего тока  $I_{gp1}$  и началом первого маломощного импульса греющего тока  $I_{gp2}$  10 с.

Моделирование проводилось в программной среде Synopsys TCAD.

На рисунке 3.3 показаны результаты моделирования варианта 1 и варианта 2 в момент времени, когда  $U_{Tn.} = U_{TI}$  (см. рисунок 3.2). Также для сравнения показаны результаты моделирования по методу 3, способ постоянной температуры кристалла из ОСТ 11 0944-96.

					МД – 02069964 – 11.04.04 – 11 – 19	Лист
						48
Изм.	Лист	№ док-м	Подпись	Дата		



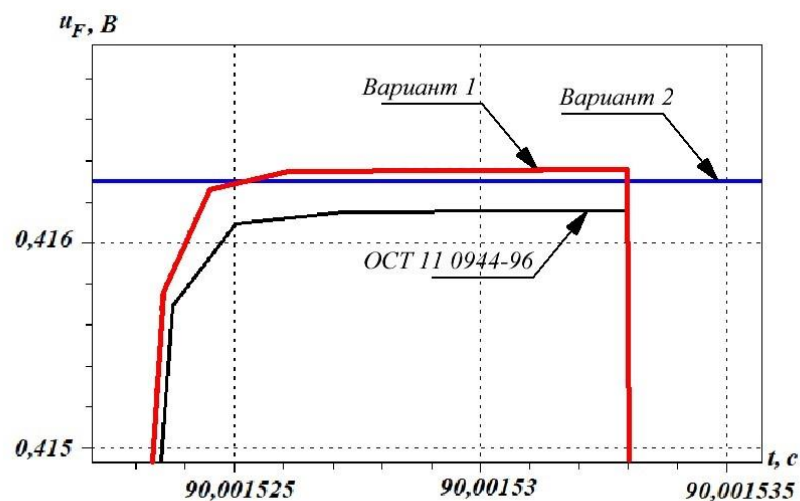


Рисунок 3.3 — Результаты моделирования варианта 1, варианта 2 и по методу 3, способ постоянной температуры кристалла из ОСТ 11 0944-96

Видно, что разница между значением падения напряжения  $U_{Tn}$  полученным в результате моделирования варианта 1 и варианта 2 и значением падения напряжения  $U_{Tn}$ , полученным в результате моделирования по методу 3, способ постоянной температуры кристалла из ОСТ 11 0944-96, составляет менее 200 мкВ. А разница между значением падения напряжения  $U_{Tn}$  полученным в результате моделирования варианта 1 и варианта 2 вообще составляет менее 50 мкВ.

Таким образом, нет необходимости в подаче маломощных импульсов греющего тока после мощного импульсов греющего тока, и, кроме того, также нет необходимости в подаче импульсов измерительного тока, вместо них можно подавать постоянный измерительный ток. Соответственно, это приведет к упрощению испытательного оборудования для определения теплового сопротивления переход-корпус микросхем.

### 3.3 Обработка результатов и определение теплового сопротивления микросхемы 124КТ1

По полученным результатам моделирования варианта 1 и варианта 2 было определено тепловое сопротивление переход-корпус микросхемы 124КТ1 по формуле 3.3.

В таблице 3.1 приведены рассчитанные значения теплового сопротивления для варианта 1 и варианта 2. Также для сравнения приведены рассчитанные значения теплового сопротивления по методу 3, способ постоянной температуры кристалла из ОСТ 11 0944-96.

Таблица 3.1 — Полученные значения падений напряжения и значения теплового сопротивления для трёх вариантов.

	$U1, В$	$I1, А$	$U2, В$	$I2, А$	$P1, Вт$	$P2, Вт$	$R_{Т,ПК}, °С/Вт$
ОСТ	0.9230	0.1000	0.4161	0.0010	0.0923	0.0004	60.946
Вариант1	0.9230	0.1000	0.4163	0.0010	0.0923	0.0004	60.947
Вариант2	0.9230	0.1000	0.4164	0.0010	0.0923	0.0004	60.947

По полученным результатам проведен расчет одной из важнейших составляющих относительной погрешности теплового сопротивления  $\delta$  варианта 1 и варианта 2 относительно метода 3, способ постоянной температуры кристалла из ОСТ 11 0944-96 по формуле (2.9).

Полученные результаты представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 — Результаты расчета одной из важнейших составляющих относительной погрешности теплового сопротивления

Значение $\delta$ вариант 1, %	Значение $\delta$ вариант 2, %
0,000218	0,000327

Из таблицы видно, что погрешности очень малы.

### 3.4 Выводы

В результате проделанной работы были получены следующие результаты:

— разработаны два варианта упрощения ОСТ методики определения теплового сопротивления;

— проведено моделирование варианта 1 и варианта 2, в результате которого было определено, что маломощные греющие и измерительные импульсы тока не нужны и для упрощения методики измерения электрических и тепловых параметров вместо импульсов можно подавать постоянный измерительный ток;

— рассчитано тепловое сопротивление для варианта 1 и варианта 2;

— рассчитана относительная погрешность варианта 1 и варианта 2 и выявлено, что при подаче постоянного измерительного тока относительная погрешность определения теплового сопротивления составляет 0,000327 %.

					МД – 02069964 – 11.04.04 – 11 – 19	Лист
						51
Изм.	Лист	№ док-м	Подпись	Дата		

## 4 Разработка управляемого источника тока

Для того, чтобы сформировать импульсы тока по вариант 2 (см. раздел 3.2), необходимо разработать управляемый источник тока (УИТ). Исходя из условий моделирования (см. раздел 3.2) УИТ должен выдавать ток амплитудой 100 мА и 1 мА. Для получения данной амплитуды УИТ должен содержать внутри два плеча, которые переключаясь с помощью контролера NI CompactRIO будут выдавать нужную амплитуду в установленные интервалы времени.

### 4.1 Разработка функциональной схемы управляемого источника тока

Управление УИТ осуществлялось с помощью среды графического программирования Labview на базе NI Compact RIO. Функциональная схема управляемого источника тока показана на рисунке 4.1.

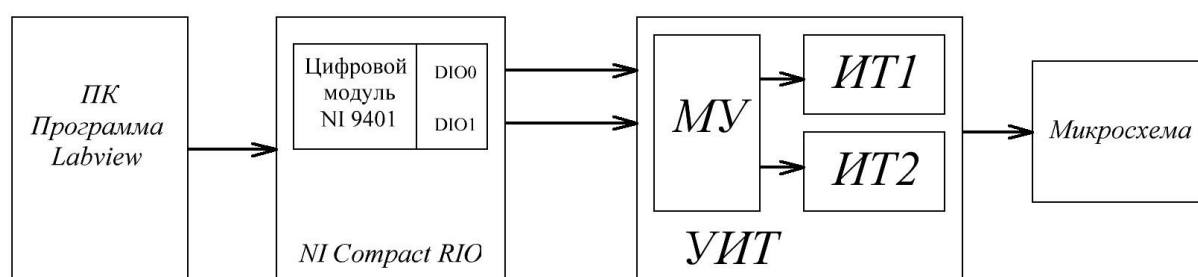


Рисунок 4.1 — Функциональная схема УИТ

Блок УИТ внутри содержит два плеча. Верхнее плечо, источник тока 1 (ИТ1) — это источник тока, который позволяет получить ток амплитудой 100 мА, нижнее плечо, источник тока 2 (ИТ2) — это источник тока, который позволяет получить ток амплитудой 1 мА.

УИТ работает следующим образом. С помощью блока ПК (Программа Labview) осуществляется программное коммутирование УИТ. Коммутирование работает следующим образом: сначала необходимо включить верхнее плечо (ИТ1) на время 5 с, путем подачи сигнала управления с первого вывода DIO0 цифрового модуля NI 9401, находящегося на платформе NI Compact RIO. По окончании времени работы ИТ1, верхнее плечо выключается (управляющий сигнал не подаётся) и через времени 2 мкс включается нижнее плечо (ИТ2), путем подачи сигнала управления со второго вывода DIO1 цифрового модуля NI 9401, находящегося на платформе NI Compact RIO на 10 мкс. По истечению 10 мкс ИТ2 выключается и ждёт повторного включения через 10 с. Как только проходит данный интервал времени, ИТ2 вновь включается и выключается в тот момент времени, когда придёт сигнал управления на выключение.

#### **4.2 Разработка электрической принципиальной схемы управляемого источника тока**

В качестве управляемого источника тока выбран источник тока, управляемый напряжением, на основе операционного усилителя (ОУ) и составного транзистора на биполярных транзисторах. Схема данного источника тока имеет широкое распространение из-за её простоты, точности и глубины регулирования тока.

Согласно цели практики, необходимо разработать управляемый источник тока с выходной амплитудой тока  $I_1 = 100$  мА и источник тока с выходной амплитудой тока  $I_2 = 1$  мА.

Источник тока на 100 мА работает следующим образом.

На неинвертирующий вход ОУ подается опорное напряжение, а на инвертирующий вход – падение напряжения на токоизмерительном резисторе (токовый шунт). Сигнал с операционного усилителя поступает на составной транзистор, состоящий из транзисторов КТ315 и ВД139, включённых по схеме

					МД – 02069964 – 11.04.04 – 11 – 19	Лист
Изм.	Лист	№ док-м	Подпись	Дата		53

Дарлингтона, который работает как усилитель постоянного тока. Таким образом, операционный усилитель управляет степенью открытия составного транзистора и, следовательно, током через него. Чем больше ток через составной транзистор, тем больше падение напряжения на шунте. Получается отрицательная обратная связь. Если в результате нагрева характеристики транзистора изменятся так, что ток через него увеличится, то это вызовет увеличение напряжения на шунте. Появится отрицательная разность напряжений на входах ОУ и выходное напряжение усилителя начнёт уменьшаться (при этом начнёт уменьшаться степень открытия ключа и ток через него), до тех пор, пока разность напряжений не станет равной нулю. Если ток через ключ уменьшится, то это вызовет уменьшение падения напряжения на токовом шунте. Появится положительная разность напряжений на входах ОУ и выходное напряжение усилителя начнёт увеличиваться (при этом будет увеличиваться степень открытия ключа и ток через него), до тех пор, пока разность напряжений на входах ОУ не станет равной нулю.

Таким образом, изменяя опорное напряжение, можно произвольным образом регулировать ток через транзистор, причём заданный ток получается стабильным, поскольку зависит только от величины опорного напряжения и сопротивления токового шунта, и не зависит от параметров силового ключа, которые могут очень сильно меняться в результате нагрева.

Источник тока на 1 мА работает аналогично, только вместо составного транзистора используется один биполярный транзистор КТ315.

Электрическая принципиальная схема приведена в приложение В.

Коэффициент усиления по напряжению операционных усилителей  $DA1$  и  $DA2$ :

$$K = -U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}} = -R_5/R_4 = -5100/5100 = 1.$$

					МД – 02069964 – 11.04.04 – 11 – 19	Лист
Изм.	Лист	№ док-м	Подпись	Дата		54

В установившемся режиме напряжение на резисторе  $R8$  равно напряжению на неинвертирующем входе ОУ. Из этого условия найдём сопротивления резисторов  $R7, R8$ :

$$R14 = \frac{K \cdot U_{ex}}{I_1} = \frac{1 \cdot 10}{0,1} = 100 \text{ Ом},$$

$$R13 = \frac{K \cdot U_{ex}}{I_2} = \frac{1 \cdot 10}{0,001} = 10 \text{ кОм}.$$

### 4.3 Разработка модели управляемого источника тока в программе Multisim

По вышеописанной электрической принципиальной схеме УИТ в программе Multisim была разработана модель УИТ.

На рисунке 4.2 приведена разработанная модель УИТ.

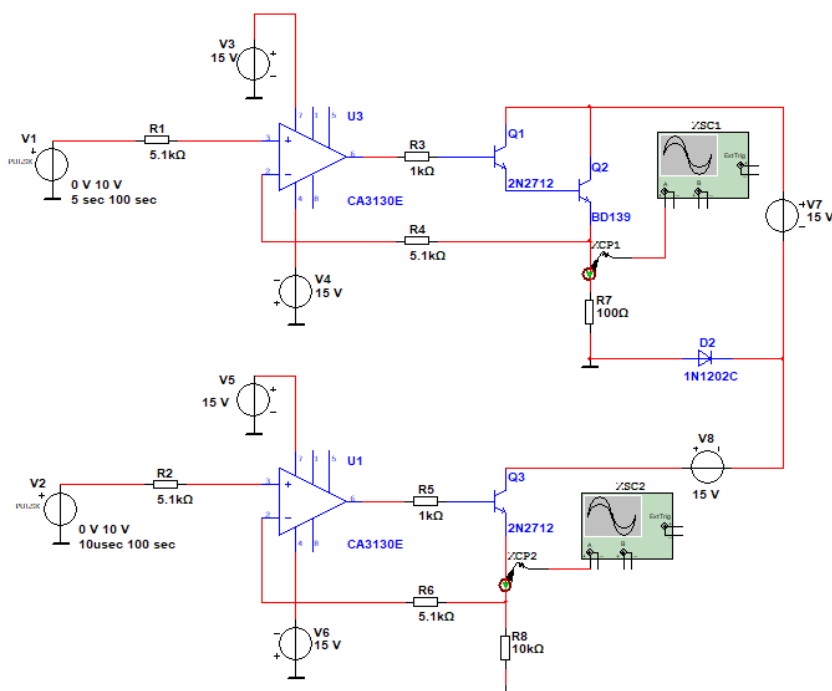


Рисунок 4.2 — Модель УИТ в программе Multisim

В программе Multisim нет моделей отечественных ОУ КР140УД8 и транзистора КТ315, поэтому для создания модели вместо данных ОУ использовались зарубежные модели ОУ CA3130 и транзистор 2N2712. В качестве нагрузки использовался диод 1N1202С.

На рисунке 4.3 показана осциллограмма работы верхнего плеча УИТ (ИТ1) на 100 мА.

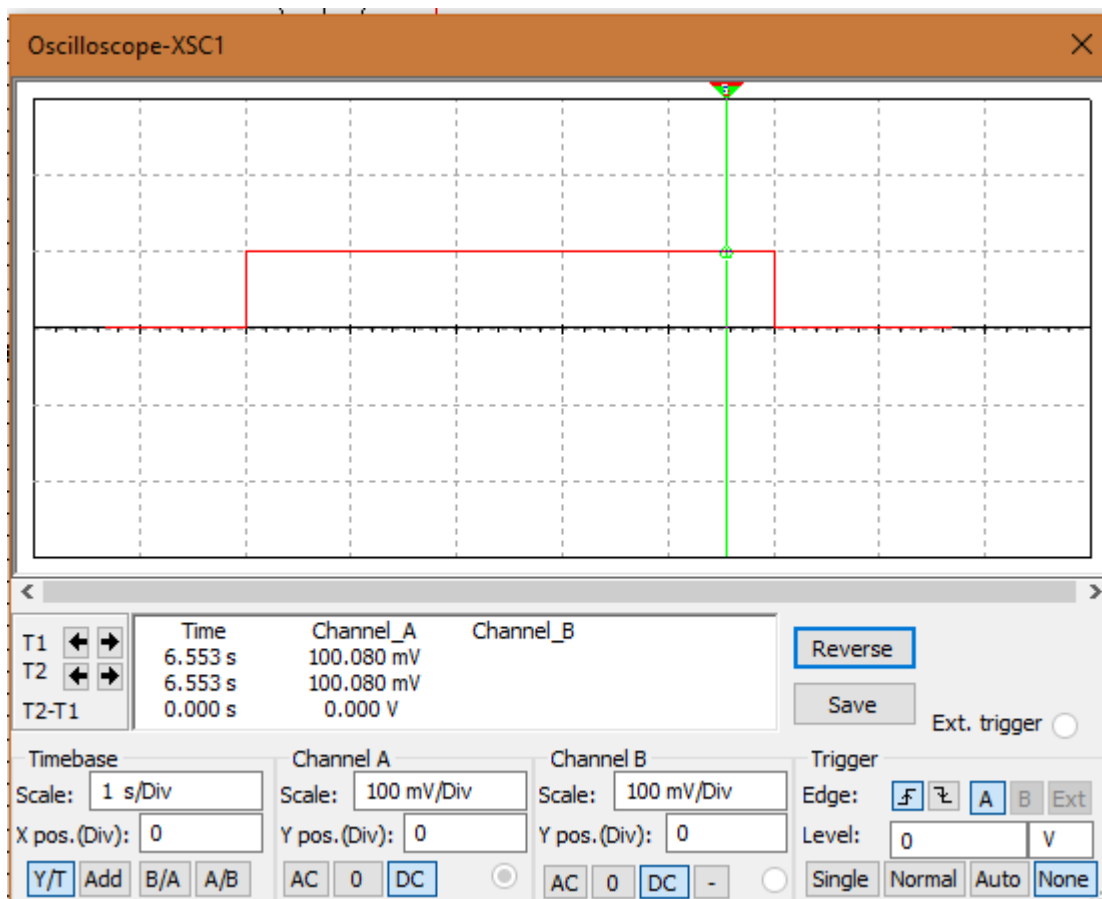


Рисунок 4.3 — Осциллограмма работы ИТ1

Для измерения величины тока использовался специальный инструмент ХСР1 Current probe. Данный инструмент позволяет узнать величину протекающего тока в цепи с помощью осциллографа. Отношение напряжения к току в инструменте Current probe выставлено  $1 \text{ mV} = 1 \text{ mA}$ . Следовательно, как видно на осциллограмме, амплитуда напряжения равна 100 мВ и



длительность 5 с, что означает, что плечо работает правильно и выдаёт ток 100 мА в течении 5 с.

На рисунке 4.4 показана осциллограмма работы неженного плеча УИТ (ИТ2) на 1 мА.

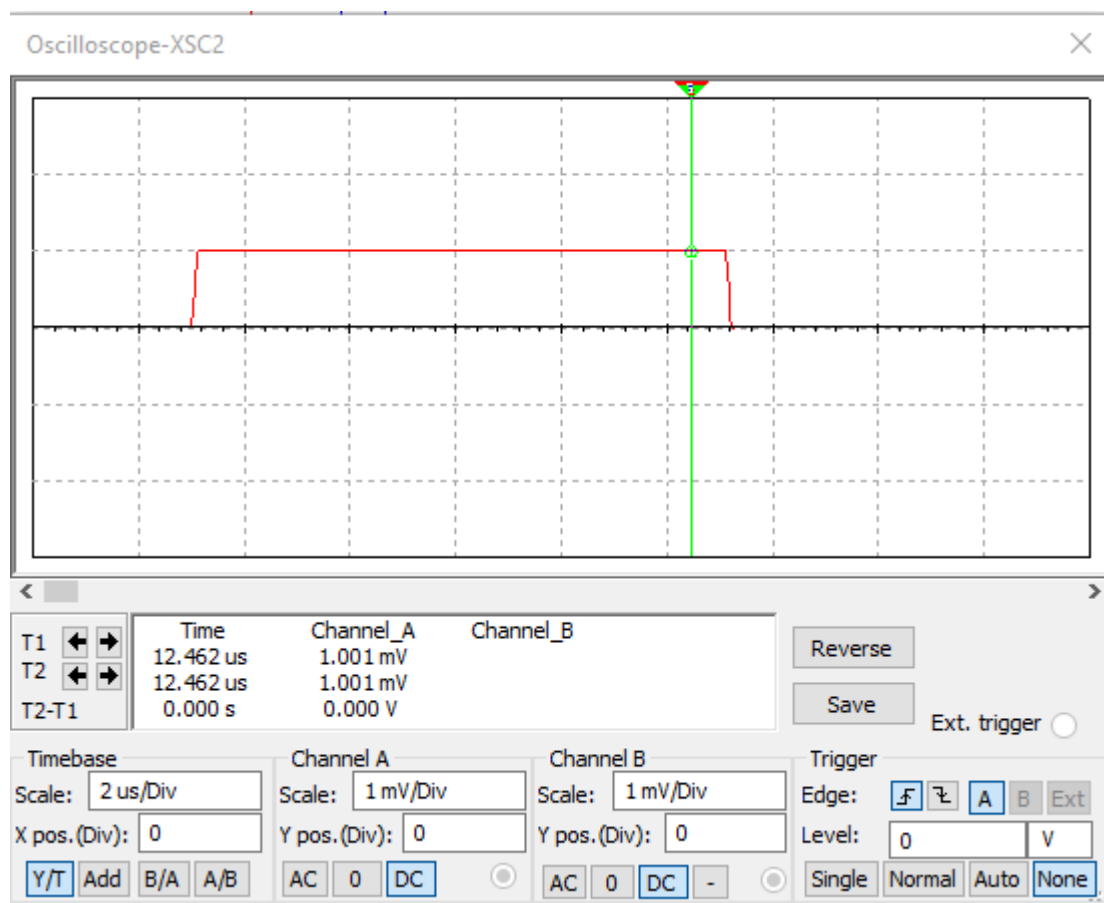


Рисунок 4.4 — Осциллограмма работы ИТ2

Для измерения величины тока использовался специальный инструмент ХСР2Current probe. Данный инструмент позволяет узнать величину протекающего тока в цепи с помощью осциллографа. Отношение напряжения к току в инструменте Current probe выставлено  $1 \text{ mV} = 1 \text{ mA}$ . Следовательно, как видно на осциллограмме, амплитуда напряжения равна 1 мВ и длительность 10мкс, что означает, что плечо работает правильно и выдаёт ток 1 мА.

По полученным результатам видно, что оба плеча УИТ работают верно.

					МД – 02069964 – 11.04.04 – 11 – 19	Лист
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата		57

#### 4.4 Разработка программы управления источником тока в LabVIEW

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) – это среда разработки и платформа для выполнения программ, созданных на графическом языке программирования «G» фирмы National Instruments (США). Первая версия LabVIEW была выпущена в 1986 году для Apple Macintosh, в настоящее время существуют версии для UNIX, GNU/Linux, Mac OS и пр., а наиболее развитыми и популярными являются версии для Microsoft Windows [14].

LabVIEW используется в системах сбора и обработки данных, а также для управления техническими объектами и технологическими процессами. Идеологически LabVIEW очень близка к SCADA-системам, но в отличие от них в большей степени ориентирована на решение задач не столько в области АСУ ТП, сколько в области АСНИ.

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) позволяет разрабатывать прикладное программное обеспечение для организации взаимодействия с измерительной и управляющей аппаратурой, сбора, обработки и отображения информации и результатов расчетов, а также моделирования как отдельных объектов, так и автоматизированных систем в целом. Разработчиком LabVIEW является американская компания National Instruments.

Контроллер CompactRIO — защищенный, надежный, высокопроизводительный встроенный контроллер промышленного класса, протестированный в соответствии с требованиями отраслевого стандарта. Отлично подходит для областей, где требуется сбор, управление и обработка сигналов с высокой скоростью, аппаратное ускорение алгоритма, выполнение серьезных аппаратных задач или уникальные возможности синхронизации и запуска. Объединяет процессор под управлением NI Linux Real-Time, программируемое устройство ПЛИС и модульный ввод/вывод с

					МД – 02069964 – 11.04.04 – 11 – 19	Лист
Изм.	Лист	№ док-м	Подпись	Дата		58

возможностями машинного зрения, отображения и управления перемещением [14].

Блок управления источником тока реализован в программной среде NI LabVIEW с использованием модуля NI 9401, входящих в состав NI CompactRIO.

При разработке использовались следующие основные блоки и структура:

— блок задержки WAIT, который задает время задержки на определенный интервал времени до того, как зависимость выходных данных станет действительной (в нашем случае с помощью этого блока задается время включения/выключения УИТ);

— блок FPGA I/O NODE с помощью, которого осуществляется связь с модулем NI 8401;

— структура Flat Sequence, которая состоит из одной или нескольких поддиаграмм или фреймов, которые выполняются последовательно.

Поток данных для структуры Flat Sequence отличается от потока данных для других структур. Кадры в структуре плоской последовательности выполняются слева направо и когда все значения данных, связанные с кадром, доступны. Данные покидают каждый фрейм по завершении фрейма. Это означает, что ввод одного кадра может зависеть от вывода другого кадра.

Полный код программы приведён в приложение Д.

Программа работает следующим образом. С помощью структуры Flat Sequence задаются последовательность включения портов вывода DIO0 и DIO1 модуля NI 9401.

На рисунке 4.5 приведен первый фрейм структуры Flat Sequence в, котором на 5 с на вывод DIO0 подаётся значение TRUE, что означает включение ИТ1.

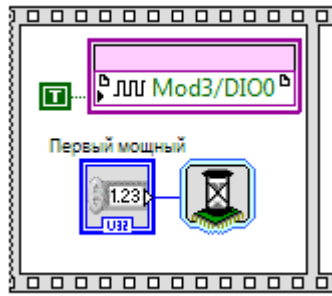


Рисунок 4.5 — Первый фрейм структуры Flat Sequence

На рисунке 4.6 приведен второй фрейм структуры Flat Sequence в, котором на вывод DIO0 подаётся значение константы FALSE, что означает выключение ИТ1.

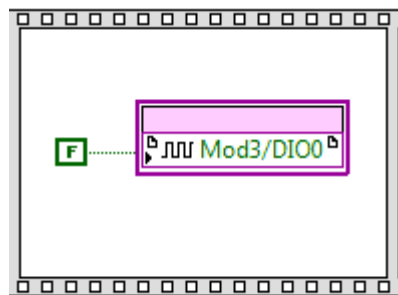


Рисунок 4.6 — Второй фрейм структуры Flat Sequence

На рисунке 4.7 показан третий фрейм структуры Flat Sequence, в котором задаётся время задержки включения ИТ2.

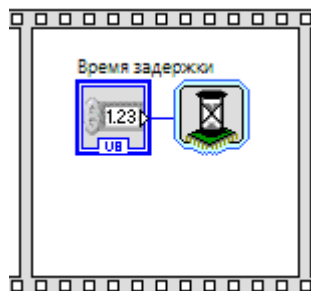


Рисунок 4.7 — Третий фрейм структуры Flat Sequence

На рисунке 4.8 приведен четвёртый фрейм структуры Flat Sequence в, котором на вывод DIO1 подаётся значение константы TRUE, что означает включение ИТ2.

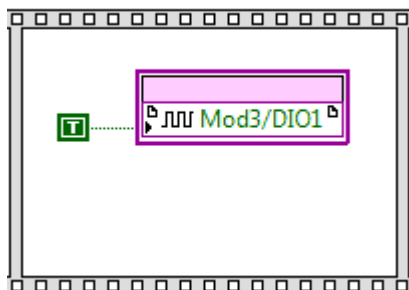


Рисунок 4.8 — Четвёртый фрейм структуры Flat Sequence

На рисунке 4.9 показан пятый фрейм структуры Flat Sequence, в котором задается длительность первого измерительного импульса.

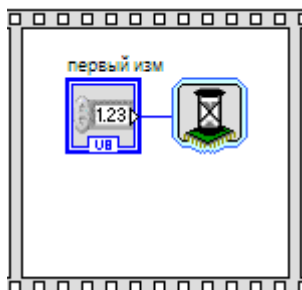


Рисунок 4.9 — Пятый фрейм структуры Flat Sequence

На рисунке 4.10 показан шестой фрейм структуры Flat Sequence в, котором на вывод DIO1 подаётся значение константы FALSE, что означает выключение ИТ2.

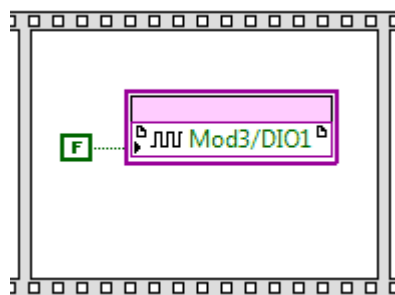


Рисунок 4.10 — Шестой фрейм структуры Flat Sequence

На рисунке 4.11 показан седьмой фрейм структуры Flat Sequence, в котором задаётся интервал времени равный 15 с выключения ИТ2.

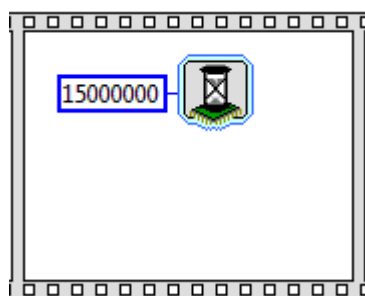


Рисунок 4.11 — Седьмой фрейм структуры Flat Sequence

После того как пройдёт интервал времени 10 с ИТ2 снова включится. Для этого необходимо снова подать значение константы TRUE на порт вывода DIO1. На рисунке 4.12 показан восьмой фрейм структуры Flat Sequence в, котором на вывод DIO1 подаётся значение константы TRUE, что означает включение ИТ2.

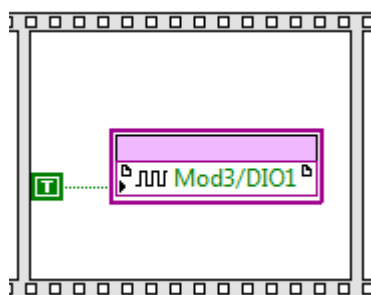


Рисунок 4.12 — Восьмой фрейм структуры Flat Sequence

На рисунке 4.12 показан восьмой фрейм структуры Flat Sequence в, котором на вывод DIO1 подаётся значение константы TRUE, что означает включение ИТ2. Выключится ИТ2 должен в тот момент, когда значение падения напряжения  $U_{Tn}$  сравнивается со значением падения напряжения измеренного на первом измерительном импульсе  $U_{T1}$ , но так как измерительной части в данной работе нету, то для утверждения правильности работы программы управления были добавлены два дополнительных фрейма структуры Flat Sequence, которые имитируют момент, когда значение падения напряжения  $U_{Tn}$  сравнивается со значением падения напряжения измеренного на первом измерительном импульсе  $U_{T1}$  и ИТ2 выключится.

На рисунке 4.13 показан девятый фрейм структуры Flat Sequence, в котором DIO1 подаётся значение константы TRUE, что означает включение ИТ2 и десятый фрейм, в котором задаётся интервал времени в течение, которого подаётся измерительный ток.

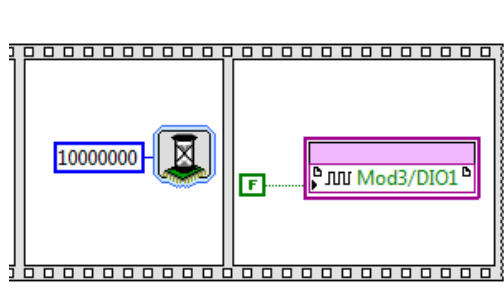


Рисунок 4.13 — Девятый и десятый фреймы структуры Flat Sequence

					МД – 02069964 – 11.04.04 – 11 – 19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		63

В каждом фрейме структуры Flat Sequence с помощью блока WAIT задаётся время включения портов вывода DIO0 и DIO1 модуля NI 9401. Временные интервалы, во время, которых должны включаться порты вывода DIO0 и DIO1 модуля NI 9401, описаны в подразделе 4.1.

На основе разработанной электрической принципиальной схемы и программы управления источником тока был собран макетный образец.

На рисунке 4.14 показан общий вид макетного образца.

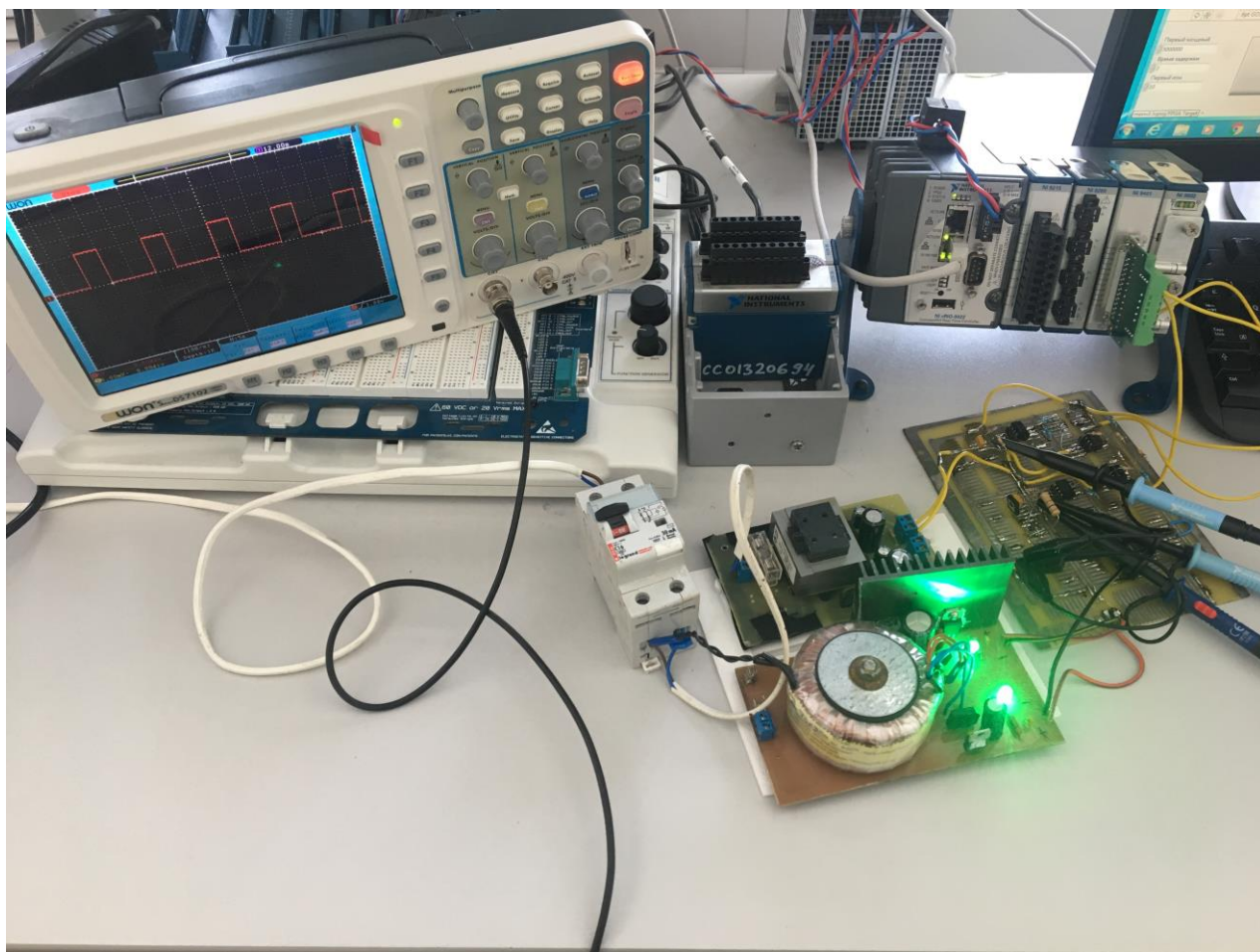


Рисунок 4.14 — Макетный образец

С помощью макетного образца было проверено, верно ли работает разработанный источник тока и разработанная программа коммутирования ИТ1 и ИТ2.

На рисунке 4.15 показана осциллограмма работы ИТ1.

					МД – 02069964 – 11.04.04 – 11 – 19	Лист
Изм.	Лист	№ док.им.	Подпись	Дата		64



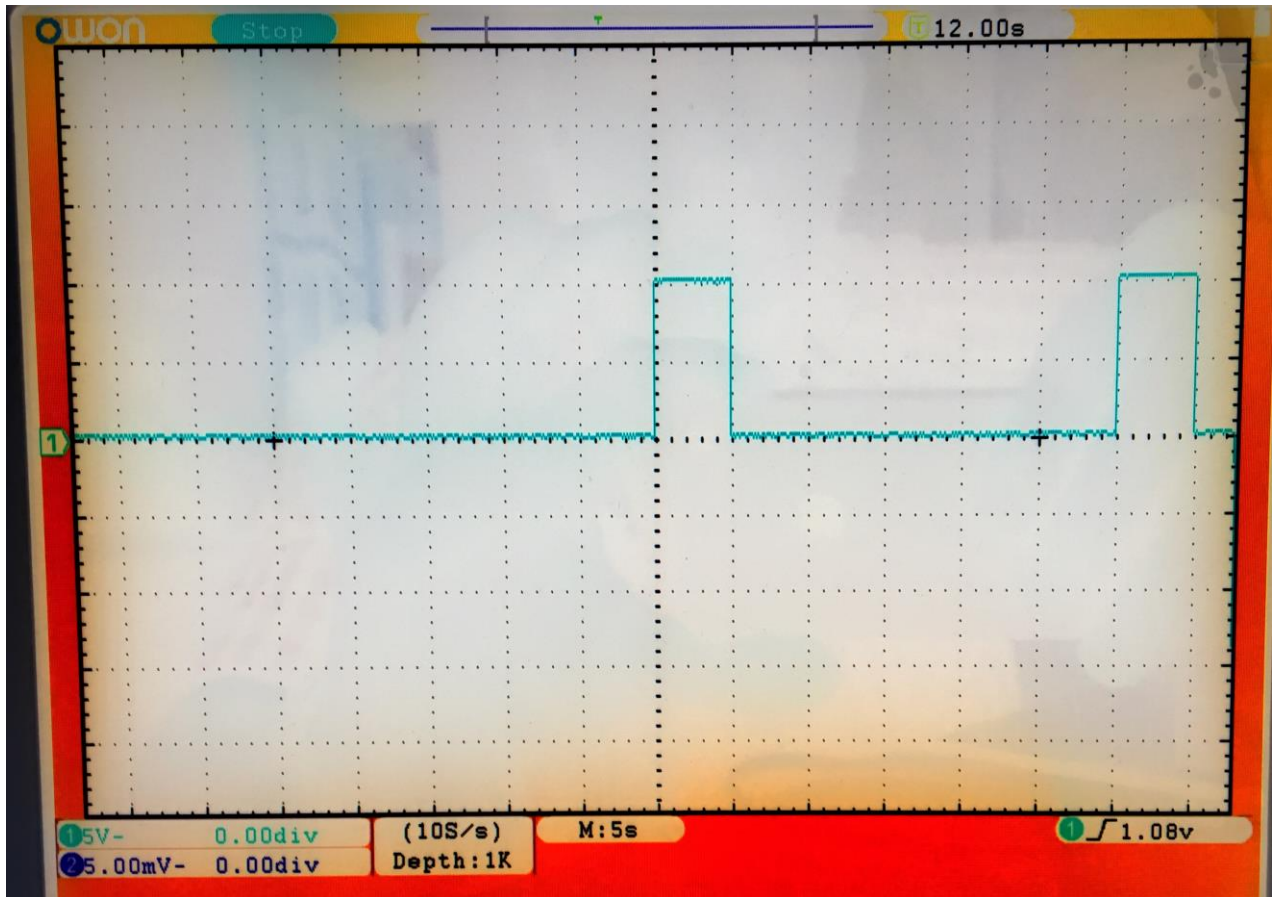


Рисунок 4.15 — Осциллограмма работы ИТ1

Как видно на рисунке 4.15, ИТ1 формирует импульсы длительностью 5 с и амплитудой 10 В, что означает верную работу источника. Для проверки правильно ли работает ИТ2 необходимо снять осциллограмму, которой будет показан первый измерительный импульс, который подаётся через 2 мкс после первого мощного греющего импульса тока. Для этого использовался дополнительный осциллограф, который был синхронизирован по заднему фронту первого мощного греющего импульса тока.

На рисунке 4.16 показана осциллограмма работы ИТ2.

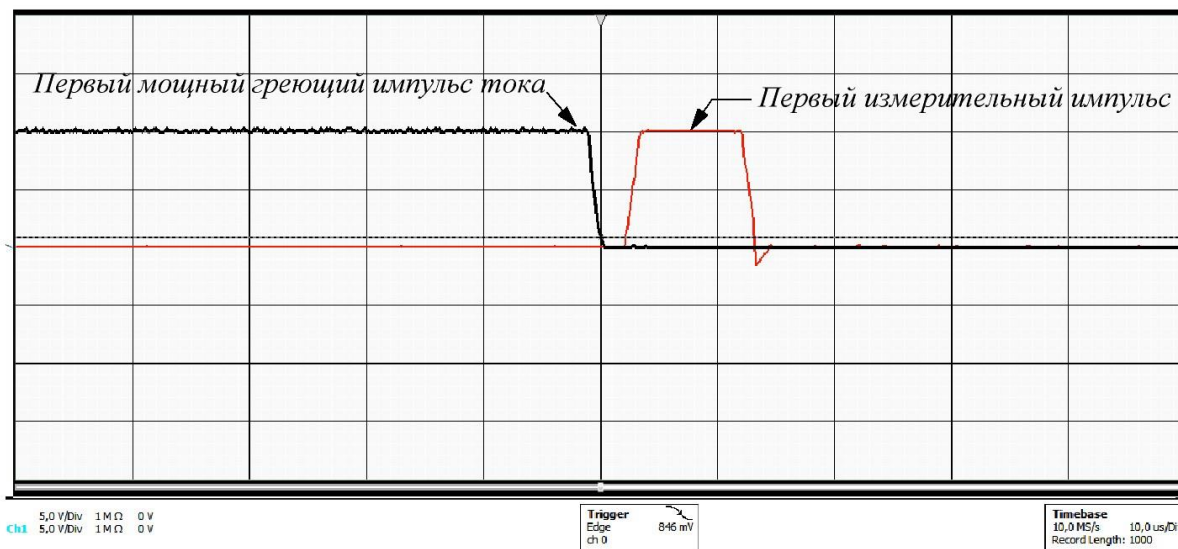


Рисунок 4.16 — Осциллограмма работы ИТ2

Как видно из приведённой осциллограммы, первый измерительный импульс подаётся ровно через 2 мкс после окончания первого мощного греющего импульса тока, при этом длительность первого измерительного импульса тока 10 мкс эти два фактора показывают, что ИТ2 работает верно.

#### 4.5 Выводы

В результате проделанной работы получены следующие результаты:

- разработана электрическая принципиальная схема управляемого источника тока;
- разработана модель управляемого источника тока в программе Multisim;
- разработана программа управления источником тока в LabVIEW;
- собран макетный образец управляемого источника тока.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе работы был проведен анализ научно-технической литературы по тепловому сопротивлению микросхем и изучен ОСТ 11 0944-96. В результате проделанной работы были выявлены следующие преимущества и недостатки методов определения теплового сопротивления, описанные в ОСТ.

Преимущества метода 2:

- высокая точность измерений.

Преимущества метода 3 (способ постоянной температуры кристалла):

- простота измерительной установки.

Недостатки метода 2:

- сложная конструкция измерительной установки;
- проводить измерения необходимо на открытом кристалле.

Недостатки метода 3 (способ постоянной температуры кристалла):

- низкая точность измерений.

Основные результаты работы можно сформулировать следующим образом:

- разработана модель кристалла микросхемы 124КТ1;
- проведено моделирование по методу 2 и методу 3 (способ постоянной температуры кристалла);
- по результатам проведенного моделирования определён теплое сопротивление переход-корпус микросхемы;
- определено оптимальное время задержки  $t_{30}$ , при котором достигается минимальная относительная погрешность при определении теплового сопротивления;
- в результате проведенного моделирования по варианту 1 и варианту 2 было определён, что маломощные греющие и измерительные импульсы тока не нужны и для упрощения методики измерения электрических и

					МД – 02069964 – 11.04.04 – 11 – 19	Лист
						67
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата		

тепловых параметров вместо импульсов можно подавать постоянный измерительный ток;

— по результатам проведенного моделирования по варианту 1 и варианту 2 было определено тепловое сопротивление переход-корпус микросхемы и определена относительная погрешность варианта 1 и варианта 2;

— разработан управляемый источник тока;

— разработана программа управления источником в программной среде NI LabVIEW, позволяющая формировать мощный греющий импульс тока и следующий после него через 2 мкс измерительный импульс тока.

					МД – 02069964 – 11.04.04 – 11 – 19	Лист
						68
Изм.	Лист	№ док-м.	Подпись	Дата		

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Беспалов Н. Н. Моделирование прямых ВАХ р-n-перехода коллектор-база транзисторов микросхемы КТ101. / Н. Н. Беспалов, Ю. В. Горячкин, К. Ю. Панькин // XLVI Огаревские чтения: материалы научной конференции: в 3 ч. Ч. 1: Технические науки. – Саранск: Мордов. гос. ун-т, 2018. – С. 248-254.

2. Беспалов Н. Н. Моделирование и исследование параметров прямых вольт-амперных характеристик диодных структур микросхемы КТ101/ Н. Н. Беспалов, Ю. В. Горячкин, К. Ю. Панькин // Научно технический вестник Поволжья. – 2018. – Вып. 5. – С. 109-112.

3. Беспалов Н. Н. Сравнительный анализ методов определения теплового сопротивления маломощных полупроводниковых приборов на основе моделирования в среде TCAD. / Н. Н. Беспалов, Ю. В. Горячкин, К. Ю. Панькин // Материалы XXII научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов национального исследовательского мордовского государственного университета им. Н. П. Огарева. Ч. 1: Технические науки. – Саранск: Мордов. гос. ун-т, 2018. – С. 37-42.

4. Беспалов Н. Н. Моделирование режимов испытания микросхем при определении теплового сопротивления переход-корпус/ Н. Н. Беспалов, Ю. В. Горячкин, К. Ю. Панькин, П. М. Дёмкин // Научно технический вестник Поволжья. – 2019. – Вып. 3. – С. 65-68.

5. Беспалов Н. Н. Оптимизация величин некоторых параметров линейных источников питания на основе стабилизаторов напряжения/ Н. Н. Беспалов, К. Ю. Панькин // Огарёв-online. – Саранск: Мордов. гос. ун-т, 2018.

6. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л. А. Бессонов. – М.: «Высшая школа», 1996. – 638 с.

7. Горячкин Ю. В. Физико-топологическое моделирование в САПР TCAD. / Ю. В. Горячкин, С. А. Нестеров, Б. П. Сурин. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2006. – 124 с.

					МД – 02069964 – 11.04.04 – 11 – 19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		69

8. Использование компьютерного моделирования в производстве силовых полупроводниковых приборов. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.protonelectrotex.com/files/project\\_52/Kompiuternoe\\_modelirovanie.pdf](http://www.protonelectrotex.com/files/project_52/Kompiuternoe_modelirovanie.pdf).

9. ОСТ 11 0944-96. Микросхемы интегральные и полупроводниковые приборы. Методы расчеты, измерения и контроля теплового сопротивления. М. : ГУП НПП Пульсар, 1997. – 110 с.

10. Пасынков В. В. Полупроводниковые приборы / В. В. Пасынков, Л. К. Чиркин. – М. : Высшая школа, 1987. – 479 с.

11. Угрюмов Е. П. Цифровая схемотехника: Учеб. пособие/ Е. П. Угрюмов. – СПб. : БХВ – Петербург, 2000. – 528 с.

12. Четвертков И. И. Резисторы. Справочник (изд. 1-е) / И. И. Четвертков, В. М. Терехов. – М. : Энергоиздат, 1981. – 352 с.

13. Юдин В .В. Методы устройства измерения теплоэлектрических параметров полупроводниковых изделий с применением импульсной модуляции электрической мощности : автореф. дис. канд. тех. наук/ В. В. Юдин ; ОАО «Ульяновское конструкторское бюро приборостроения», Ульяновск. гос. тех. университет – Ульяновск, 2009. – 23.

14. LabView System Design Software. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ni.com/labview/>.

15. National Instruments 9401 Measurement System. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/ru/nid/209904>.

16. Structure Editor. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.synopsys.com/silicon/tcad/structure-editor.html>.

17. Sentaurus Device. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.synopsys.com/silicon/tcad/device-simulation/sentaurus-device.html>.

18. Technology Computer Aided Design (TCAD). – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.synopsys.com/silicon/tcad.html>.

19. 124КТ1А,Б. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://orbita.su/catalog/item/124kt1a-b-78>.

					МД – 02069964 – 11.04.04 – 11 – 19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		70

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

### Текст командного файла для создания модели микросхемы 124КТ1 в программе Structure Editor

```
;--- 3D structure
(define A (sdegeo:create-cylinder (position 400 400 -2900) (position 400 400 1700) 4200 "Cobalt"
"region_2"))
(define B (sdegeo:create-cylinder (position 400 400 -2900) (position 400 400 1300) 3800 "Cobalt"
"region_3"))
(sdegeo:bool-subtract (list A B))
(sdegeo:create-cylinder (position 400 400 -400) (position 400 400 -2900) 3800 "Cobalt" "region_4")
(sdegeo:create-cylinder (position 400 400 -800) (position 400 400 -2900) 3400 "Insulator1" "region_5")
(sdegeo:create-cuboid (position 0 0 0) (position 800 800 -400) "Silicon" "region_6")

;--- Contacts

;--- Base1
(define RECT (sdegeo:imprint-rectangular-wire (position 291 349 0) (position 334 366 0)))
(sdegeo:set-contact (find-face-id (position 315 360 0)) "Base1")

;--- Emitter1
(define RECT (sdegeo:imprint-rectangular-wire (position 301 402 0) (position 324 425 0)))
(sdegeo:set-contact (find-face-id (position 315 415 0)) "Emitter1")

;--- Base2
(define RECT (sdegeo:imprint-rectangular-wire (position 466 349 0) (position 509 366 0)))
(sdegeo:set-contact (find-face-id (position 485 360 0)) "Base2")

;--- Emitter2
(define RECT (sdegeo:imprint-rectangular-wire (position 476 402 0) (position 499 425 0)))
(sdegeo:set-contact (find-face-id (position 485 415 0)) "Emitter2")

;--- Collector
(define POLY (sdegeo:imprint-polygonal-wire (list
(position 277 307 0) (position 277 292 0) (position 523 292 0) (position 523 307 0)
(position 457 307 0) (position 426 325 0) (position 408 356 0)
(position 408 444 0) (position 426 476 0) (position 457 493 0)
(position 523 493 0) (position 523 508 0) (position 277 508 0) (position 277 493 0)
(position 343 493 0) (position 374 476 0) (position 392 444 0)
(position 392 356 0) (position 374 325 0) (position 343 307 0) (position 277 307 0))))
(sdegeo:set-contact (find-face-id (position 400 400 0)) "Collector")

;--- Collector_thermo
(define CIRC (sdegeo:imprint-circular-wire (position 400 400 -2900) 3800))
(sdegeo:set-contact (find-face-id (position 400 400 -2900)) "Collector_thermo")
```

					МД – 02069964 – 11.04.04 – 11 – 19	Лист
						70
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

## Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А

```
(sdegeo:set-contact (find-face-id (position 400 4070 -2900)) "Collector_thermo")
(sdegeo:set-contact (find-face-id (position 400 4470 -2900)) "Collector_thermo")
(sdegeo:set-contact (find-face-id (position 400 4600 -1900)) "Collector_thermo")
(sdegeo:set-contact (find-face-id (position 400 400 1700)) "Collector_thermo")

(sdedr:define-refinement-size "co" 2000 2000 1500 700 700 500)
(sdedr:define-refinement-material "co" "co" "Cobalt" )

(sdedr:define-refinement-size "cu" 5000 5000 2000 2000 2000 1000)
(sdedr:define-refinement-material "cu" "cu" "Copper" )

;--- Constsnt Profile

;--- Constsnt Profile sub
(sdedr:define-refeval-window "sub" "Cuboid" (position 0 0 -7) (position 800 800 -400))
(sdedr:define-constant-profile "sub" "BoronActiveConcentration" 1.5e15)
(sdedr:define-constant-profile-placement "sub" "sub" "sub")

;--- Meshing Strategy sub
(sdedr:define-refeval-window "sub" "Cuboid" (position 0 0 0) (position 800 800 -300))
(sdedr:define-refinement-size "sub" 200 200 100 50 50 20)
(sdedr:define-refinement-function "sub" "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-placement "sub" "sub" "sub" )

;--- Constsnt Profile n
(sdedr:define-refeval-window "n" "Cuboid" (position 0 0 0) (position 800 800 -7))
(sdedr:define-constant-profile "n" "PhosphorusActiveConcentration" 4.8e15)
(sdedr:define-constant-profile-placement "n" "n" "n")

;--- Meshing Strategy n
(sdedr:define-refeval-window "n" "Cuboid" (position 0 0 0) (position 800 800 -15))
(sdedr:define-refinement-size "n" 100 100 3 3 3 1.5)
(sdedr:define-refinement-function "n" "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-placement "n" "n" "n" )

;--- Analytical Profiles
(sdedr:define-gaussian-profile "emit" "BoronActiveConcentration"
    "PeakPos" 0.0 "PeakVal" 3e+18
    "ValueAtDepth" 4.8e+15 "Depth" 2.8
    "Gauss" "Factor" 0.8)

(sdedr:define-gaussian-profile "base" "PhosphorusActiveConcentration"
    "PeakPos" 0.0 "PeakVal" 1e+21
    "ValueAtDepth" 1.1e+17 "Depth" 2.1
    "Gauss" "Factor" 0.8)

(sdedr:define-gaussian-profile "coll" "BoronActiveConcentration"
    "PeakPos" 0.0 "PeakVal" 2e+19
    "ValueAtDepth" 4.8e+15 "Depth" 8
    "Gauss" "Factor" 0.8)

;--- emit1 profile
(sdedr:define-refeval-window "BaseLine_emit1" "Polygon" (list
(position 291 400 0) (position 293 396 0) (position 297 393 0)
```

					МД – 02069964 – 11.04.04 – 11 – 19	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		71



## Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А

```
(position 328 393 0) (position 332 396 0) (position 334 400 0)
(position 334 429 0) (position 332 433 0) (position 328 436 0)
(position 297 436 0) (position 293 433 0) (position 291 429 0)))
(sdedr:define-analytical-profile-placement "emit1" "emit" "BaseLine_emit1" "Negative" "NoReplace" "Eval")
;--- emit2 profile
(sdedr:define-refeval-window "BaseLine_emit2" "Polygon" (list
(position @<291+175>@ 400 0) (position @<293+175>@ 396 0) (position @<297+175>@ 393 0)
(position @<328+175>@ 393 0) (position @<332+175>@ 396 0) (position @<334+175>@ 400 0)
(position @<334+175>@ 429 0) (position @<332+175>@ 433 0) (position @<328+175>@ 436 0)
(position @<297+175>@ 436 0) (position @<293+175>@ 433 0) (position @<291+175>@ 429 0)))
(sdedr:define-analytical-profile-placement "emit2" "emit" "BaseLine_emit2" "Negative" "NoReplace" "Eval")

;--- base1 profile
(sdedr:define-refeval-window "BaseLine_base1" "ComplexPolygon" (list
(list (position 261 363 0) (position 271 345 0) (position 289 335 0)
(position 336 335 0) (position 354 345 0) (position 364 363 0)
(position 364 437 0) (position 354 455 0) (position 336 465 0)
(position 289 465 0) (position 271 455 0) (position 261 437 0))
(list (position 271 394 0) (position 278 380 0) (position 292 373 0)
(position 333 373 0) (position 347 380 0) (position 354 394 0)
(position 354 434 0) (position 347 448 0) (position 333 455 0)
(position 292 455 0) (position 278 448 0) (position 271 434 0)))
(sdedr:define-analytical-profile-placement "base1" "base" "BaseLine_base1" "Negative" "NoReplace" "Eval")

;--- base2 profile
(sdedr:define-refeval-window "BaseLine_base2" "ComplexPolygon" (list
(list (position @<261+175>@ 363 0) (position @<271+175>@ 345 0) (position @<289+175>@ 335 0)
(position @<336+175>@ 335 0) (position @<354+175>@ 345 0) (position @<364+175>@ 363 0)
(position @<364+175>@ 437 0) (position @<354+175>@ 455 0) (position @<336+175>@ 465 0)
(position @<289+175>@ 465 0) (position @<271+175>@ 455 0) (position @<261+175>@ 437 0))
(list (position @<271+175>@ 394 0) (position @<278+175>@ 380 0) (position @<292+175>@ 373 0)
(position @<333+175>@ 373 0) (position @<347+175>@ 380 0) (position @<354+175>@ 394 0)
(position @<354+175>@ 434 0) (position @<347+175>@ 448 0) (position @<333+175>@ 455 0)
(position @<292+175>@ 455 0) (position @<278+175>@ 448 0) (position @<271+175>@ 434 0)))
(sdedr:define-analytical-profile-placement "base2" "base" "BaseLine_base2" "Negative" "NoReplace" "Eval")

;--- coll profile
(sdedr:define-refeval-window "BaseLine_coll" "ComplexPolygon" (list
(list (position 210 350 0) (position 234 308 0) (position 276 284 0)
(position 524 284 0) (position 566 308 0) (position 590 350 0)
(position 590 450 0) (position 566 492 0) (position 524 516 0)
(position 276 516 0) (position 234 492 0) (position 210 450 0))
(list (position 242 358 0) (position 257 331 0) (position 284 316 0)
(position 341 316 0) (position 368 331 0) (position 383 358 0)
(position 383 442 0) (position 368 469 0) (position 341 484 0)
(position 284 484 0) (position 257 469 0) (position 242 442 0))
(list (position @<242+175>@ 358 0) (position @<257+175>@ 331 0) (position @<284+175>@ 316 0)
(position @<341+175>@ 316 0) (position @<368+175>@ 331 0) (position @<383+175>@ 358 0)
(position @<383+175>@ 442 0) (position @<368+175>@ 469 0) (position @<341+175>@ 484 0)
(position @<284+175>@ 484 0) (position @<257+175>@ 469 0) (position @<242+175>@ 442 0)))
(sdedr:define-analytical-profile-placement "coll" "coll" "BaseLine_coll" "Negative" "NoReplace" "Eval")

;--- coll2 profile
```

					МД – 02069964 – 11.04.04 – 11 – 19	Лист 72
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		

## Окончание ПРИЛОЖЕНИЯ А

```
(sdedr:define-refeval-window "BaseLine_coll2" "ComplexPolygon" (list
(list (position 210 350 0) (position 234 308 0) (position 276 284 0)
(position 524 284 0) (position 566 308 0) (position 590 350 0)
(position 590 450 0) (position 566 492 0) (position 524 516 0)
(position 276 516 0) (position 234 492 0) (position 210 450 0))
(list (position 242 358 0) (position 257 331 0) (position 284 316 0)
(position 341 316 0) (position 368 331 0) (position 383 358 0)
(position 383 442 0) (position 368 469 0) (position 341 484 0)
(position 284 484 0) (position 257 469 0) (position 242 442 0))
(list (position @<242+175>@ 358 0) (position @<257+175>@ 331 0) (position @<284+175>@ 316 0)
(position @<341+175>@ 316 0) (position @<368+175>@ 331 0) (position @<383+175>@ 358 0)
(position @<383+175>@ 442 0) (position @<368+175>@ 469 0) (position @<341+175>@ 484 0)
(position @<284+175>@ 484 0) (position @<257+175>@ 469 0) (position @<242+175>@ 442 0))))
(sdedr:define-analytical-profile-placement "coll2" "emit" "BaseLine_coll2" "Negative" "NoReplace" "Eval")

(sde:build-mesh "n@node@")
```

					МД – 02069964 – 11.04.04 – 11 – 19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		73

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

### Текст командного файла для программы Sentaurus Device

```
Device KT124 {  
  Electrode {  
    {name="Base1" Voltage=0 resist=7e-1 }  
    {name="Base2" Voltage=0 resist=7e-1 }  
    {name="Emitter1" Voltage=0 resist=7e-1 }  
    {name="Emitter2" Voltage=0 resist=7e-1 }  
    {name="Collector" Voltage=0 resist=7e-1 }  
  }  
  
  Thermode {  
    {name="Collector_thermo" Temperature=@<Temp+273>@  
    Temperature=(@<Temp+273>@ at 0, @<Temp+273>@ at 15, @<Temp+273-7>@ at 105)} }  
  
  File {  
    grid = "n1_msh.tdr"  
    current = "n@node@"  
    plot = "n@node@"  
    parameter="sdevice.par"  
  }  
  
  Plot {  
    Doping  
    eQuasiFermi  
    eDensity hDensity  
    Current  
    Potential ElectricField  
    eLifetime hLifetime  
    SpaceCharge  
    Temperature TotalHeat  
  }  
  
  Physics {  
    Thermodynamic  
    Temperature = @<Temp+273-5>@  
    EffectiveIntrinsicDensity ( BandGapNarrowing (OldSlotboom) )  
    Mobility(  
      DopingDep
```

					МД – 02069964 – 11.04.04 – 11 – 19	Лист
						74
Изм.	Лист	№ док-м	Подпись	Дата		

## Окончание ПРИЛОЖЕНИЯ Б

```
    HighFieldSaturation
    CarrierCarrierScattering
)
Recombination(
    SRH (DopingDep TempDep)
    Auger
)
}
}

Math {
    Iterations=10
    NoAutomaticCircuitContact
    Digits=7
    BreakCriteria { LatticeTemperature ( MaxVal=573 ) }
    Number_of_Threads=10
    Method=ParDiSo
    Transient=BE
}

System {
    Isource_pset Iheat1 (0 1) { pwl=(0 0 1u 100m 105 100m) }
    KT124 VT1 (Collector=1 Base1=0 Base2=0 Emitter1=0 Emitter2=0)
    Plot "KT101sch_n@node@" (time() v(1) i(Iheat1 1))
}

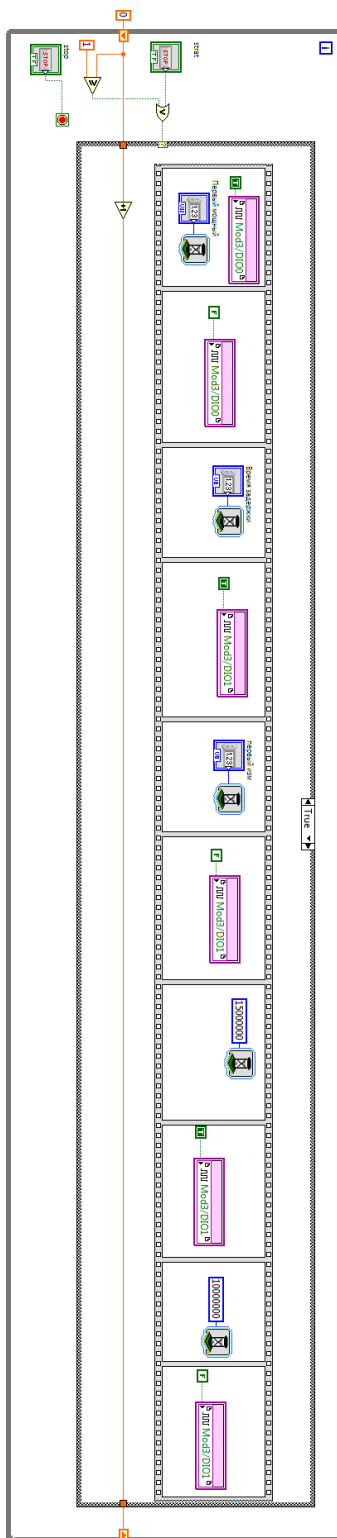
Solve {
    Poisson
    Coupled { Poisson Electron Hole Contact Circuit }
    NewCurrentFile=New
    Transient (
        InitialTime = 0 FinalTime = 115.01
        InitialStep = 1e-8 MaxStep = 1 MinStep = 1e-15
        Increment = 1.7
    )
    {Coupled { Poisson Electron Hole Temperature Contact Circuit TContact TCircuit }
        Plot (FilePrefix="n@node@" Time=(0; 5; 5.000001; 5.000022) NoOverWrite)
    }
}
}
```

					МД – 02069964 – 11.04.04 – 11 – 19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		75

# ПРИЛОЖЕНИЕ Д

(обязательное)

## Код программы LabVIEW

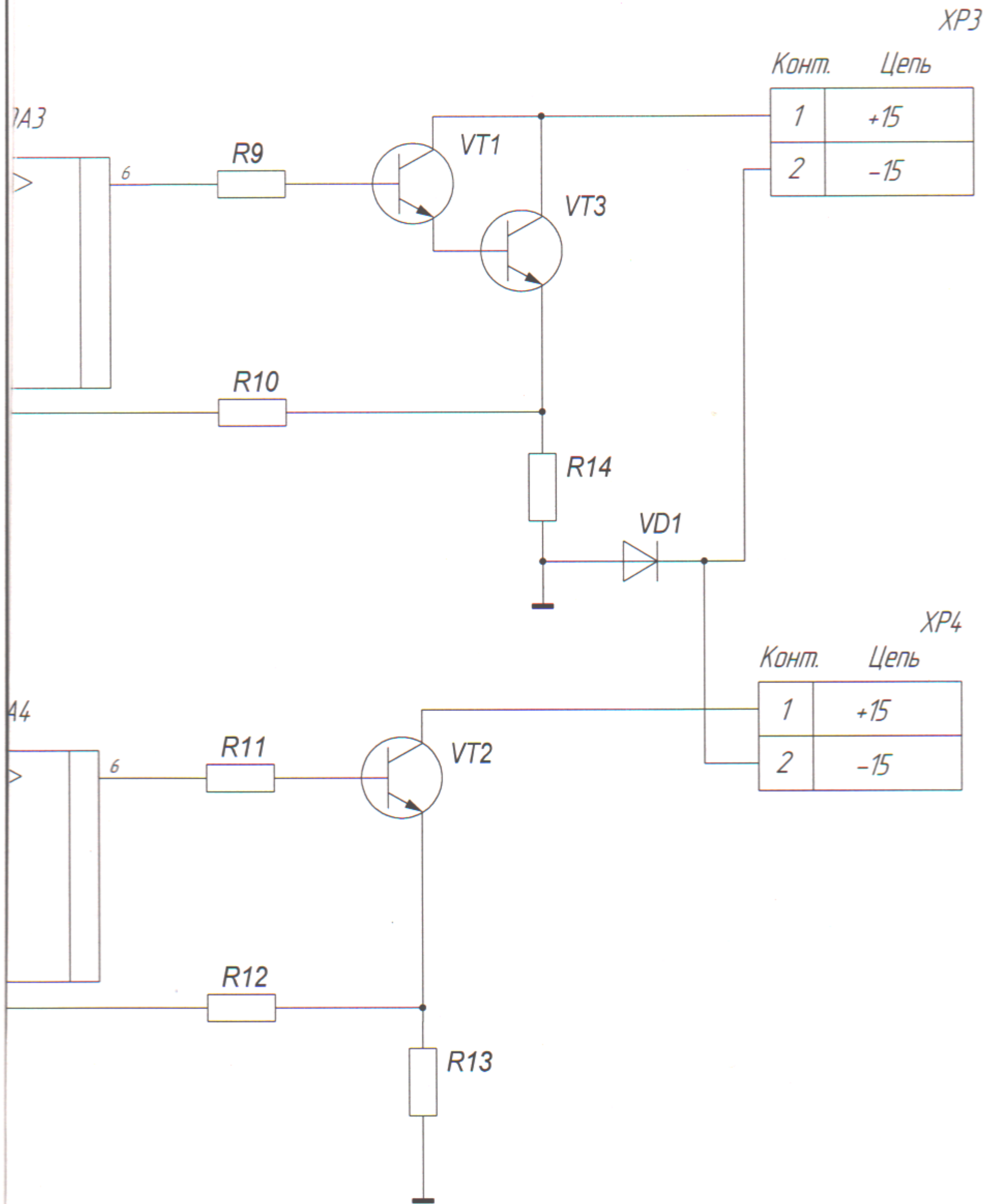


Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

МД – 02069964 – 11.04.04 – 11 – 19

Лист

76



					МД - 02069964 - 11.04.04 - 11 - 19			
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Электрическая принципиальная схема управляемого источника тока	Лит	Масса	Масштаб
Разраб.	Панькин К. Ю.		<i>[Signature]</i>	14.06.19				1:1
Провер.	Горячкин Ю. В.		<i>[Signature]</i>	14.06.19				
Реценз.	Федотов Ю. Б.		<i>[Signature]</i>	13.06.19	ПРИЛОЖЕНИЕ В	Лист 1	Листов 1	
Н. контр.	Шестёркина А. А.		<i>[Signature]</i>	14.06.19		МГУ им. Н. П. Огарёва ИЭС ЭНЭ 611 гр.		
Утверд.	Беспалов Н. Н.		<i>[Signature]</i>	13.06.19				

Поз. обознач.	Наименование	Кол.	Примечание
	Микросхемы		
DA1-DA4	KP140УД8	4	
	Резисторы		
R1, R2	MF-25 (C2-23) 0.25 Вт, 5.1 кОм, 1%	2	
R3-R6	MF-25 (C2-23) 0.25 Вт, 10 кОм, 1%	4	
R7, R8	MF-25 (C2-23) 0.25 Вт, 5.1 кОм, 1%	2	
R9, R11	MF-25 (C2-23) 0.25 Вт, 1 кОм, 1%	2	
R10, R12	MF-25 (C2-23) 0.25 Вт, 5.1 кОм, 1%	2	
R13	MF-25 (C2-23) 0.25 Вт, 10 кОм, 1%	1	
R14	KNP-200 2 Вт, 100 Ом, 5%	1	
	Транзисторы		
VT1, VT2	KT315	2	
VT3	BD139	1	
	Разъемы		
XP1-XP4	Разъем PBS 1x2	4	

МД - 02069964 - 11.04.04 - 11 - 19

Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист	Масса	Масштаб
Разраб.		Панькин К. Ю.	<i>К. Ю. Панькин</i>	14.06.19			
Провер.		Горячкин Ю. В.	<i>Ю. В. Горячкин</i>	14.06.19			
Реценз.		Федотов Ю. Б.	<i>Ю. Б. Федотов</i>	14.06.19	Лист 1		Листов 1
Н. контр.		Шестеркина А. А.	<i>А. А. Шестеркина</i>	14.06.19			
Утверд.		Беспалов Н. Н.	<i>Н. Н. Беспалов</i>	19.06.19			

Перечень элементов

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

МГУ им. Н. П. Огарёва  
ИЭС ЭНЭ 611 гр.

	Формат	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
1					
2			<u>Документация текстовая</u>		
3					
4	A4	МД - 02069964 - 11.04.04 - 11 -19	Пояснительная записка	79	
5					
6			<u>Документация</u>		
7			<u>графическая</u>		
8					
9	A3	МД - 02069964 - 11.04.04 - 11 -19	Электрическая принципиальная схема		
10			управляемого источника тока	1	Прил. В
11					
12			<u>Документация прочая</u>		
13					
14	A4	МД - 02069964 - 11.04.04 - 11 -19	Текст командного файла		
15			для создания модели микросхемы		
16			124KT1 в программе StructureEditor	4	Прил. А
17					
18	A4	МД - 02069964 - 11.04.04 - 11 -19	Текст командного файла		
19			для программы SentaurusDevice	2	Прил. Б
20					
21	A4	МД - 02069964 - 11.04.04 - 11 -19	Перечень элементов	1	Прил. Г
22					
23	A4	МД - 02069964 - 11.04.04 - 11 -19	Код программы LabVIEW	1	Прил. Д

МД - 02069964 - 11.04.04 - 11 -19

Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Разработка и исследование метода и аппаратуры для определения теплового сопротивления микросхем	Лит	Масса	Масштаб
Разраб.		Панькин К. Ю.		14.06.19				
Провер.		Горячкин Ю. В.		14.06.19				
Реценз.		Федотов Ю. Б.		13.06.19				
Н. контр.		Шестеркина А. А.		14.06.19				
Утверд.		Беспалов Н. Н.		15.06.19				
						Лист 1	Листов 1	
						МГУ им. Н. П. Огарёва ИЭС ЭНЭ 611 зр.		




Заявление о самостоятельном характере выполнения выпускной  
квалификационной работы

Я, Панькин Кирилл Юрьевич, студент 2 курса, направления подготовки 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника» заявляю, что в моей выпускной квалификационной работе на тему «Разработка и исследование метода и аппаратуры для определения теплового сопротивления микросхем», представленной в Государственную экзаменационную комиссию для публичной защиты, не содержится элементов неправомерных заимствований.

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


Я ознакомлен с действующем в Университет Положением о проверке выпускных квалификационных работ студентов ФГБОУ ВПО «МГУ ИМ. Н. П. Огарёва» на наличие заимствований, в соответствии с которыми обнаружение неправомерных заимствований является основанием для неудовлетворительной оценки выпускной квалификационной работы.

  
Подпись студента

12.06.19  
Дата

*Работа представлена для проверки в Системе*

12.06.19  
Дата представления  
магистерской диссертации

  
подпись руководителя  
магистерской диссертации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
МОРДОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Н.П.  
ОГАРЁВА»  
(ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарёва»)

**ОТЧЕТ**

*о результатах проверки бакалаврской работы обучающегося  
на наличие заимствований*

Автор работы Панькин Кирилл Юрьевич  
Тема работы Разработка и исследование метода и аппаратуры для  
определения теплового сопротивления микросхем  
Руководитель Горячкин Юрий Викторович

Представленная работа прошла проверку на наличие заимствований в  
системе «Антиплагиат. ВУЗ»

Результаты автоматической проверки:	оригинальность	90,84 %
	цитирования	0,81 %
	заимствования	8,35 %

Результаты анализа полного отчета на наличие заимствований:  
правомерные заимствования: 10,32 %

корректные цитирования: 0,81 %

неправомерные заимствования: нет

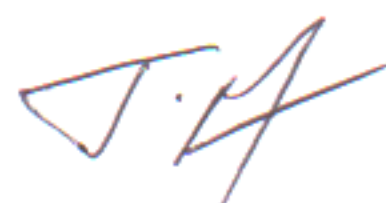
признаки обхода системы: нет

Общее заключение об итоговой оригинальности работы и возможности  
ее допуска к защите:

оригинальность 90,84 %;

студент допускается к предварительной защите и защите ВКР в ГЭК.

Руководитель  
доцент



Горячкин Ю. В.

## ОТЗЫВ

на выпускную квалификационную работу Панькина Кирилла Юрьевича  
студента 2 курса магистратуры очной формы обучения  
Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарева  
Института электроники и светотехники  
направления подготовки «Электроника и наноэлектроника»  
на тему: «Разработка и исследование метода и аппаратуры для определения  
теплового сопротивления микросхем»

Целью магистерской диссертации являлось анализ и освоение методов определения теплового сопротивления микросхем, изложенных в ОСТ 11 0944-96, разработка управляемого источника тока и модифицированного метода определения теплового сопротивления микросхем.

В процессе исследовательской работы был проведен анализ основных проблем при определении теплового сопротивления микросхем. Результатом исследовательской работы должен был стать метод определения теплового сопротивления микросхем.

В качестве базового метода определения теплового сопротивления микросхем был выбран метод определения теплового сопротивления микросхем с помощью термочувствительного параметра, который описан в ОСТ 11 0944-96. Для разработки метода использовалось компьютерное моделирование в приборно-технологической среде Synopsys TCAD. Данный программный пакет позволяет проводить исследование электрических и тепловых параметров структур полупроводниковых приборов и микросхем путем моделирования.

При моделировании существующего метода определения теплового сопротивления микросхем было выявлено, что маломощные греющие импульсы тока и измерительные импульсы не нужны и на практике создать такие импульсы очень проблематично и для этого требуется высокоточное и дорогое оборудование. Было принято решение о модификации метода.

С поставленными задачами магистрант справился успешно. В ходе работы были освоены методы определения теплового сопротивления микросхем, определено тепловое сопротивление микросхемы 124КТ1, разработан модифицированный метод определения теплового сопротивления микросхем. Для модифицированного метода был разработан управляемый источник тока и программа управления источником в программной среде LabVIEW. Рассчитаны на основании проведенного моделирования значения теплового сопротивления по двум методам из ОСТ и по модифицированному методу. Определено оптимальное время задержки между греющим и измерительным импульсами тока для получения минимальной погрешности при определении теплового сопротивления переход-корпус микросхем.

В целом магистерская диссертация полностью отражает решение поставленного задания. Корректно проведен анализ поставленных задач.

За время обучения магистрант Панькин К. Ю. зарекомендовал себя самостоятельным и грамотным специалистом, умеющим решать инженерные задачи.

Результаты проверки магистерской диссертации на наличие заимствований показали оригинальность работы 90,84 %.

Считаю, что выпускная квалификационная работа в форме магистерской диссертации заслуживает оценки «отлично», а выпускник Панькин К. Ю. квалификации – магистр по направлению подготовки 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника».

Руководитель работы  
к.т.н., доцент



Ю. В. Горячкин

## РЕЦЕНЗИЯ

на выпускную квалификационную работу Панькина Кирилла Юрьевича  
студента 2 курса магистратуры очной формы обучения  
Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарева  
Института электроники и светотехники  
направления подготовки «Электроника и наноэлектроника»  
на тему: «Разработка и исследование метода и аппаратуры для определения  
теплового сопротивления микросхем»

Рецензируемая работа посвящена разработке и исследованию метода и аппаратуры для определения теплового сопротивления микросхем.

Работа содержит пояснительную записку объемом 79 страниц печатного текста.

Тема магистерской диссертации актуальна – тепловое сопротивление полупроводниковых приборов и микросхем в установившемся режиме является одним из важнейших их параметров. По величине теплового сопротивления можно быстро и с высокой точностью оценивать качество изготовления полупроводниковых приборов и микросхем, температуру кристалла в различных режимах эксплуатации и проводить отбраковку потенциально ненадежных приборов.

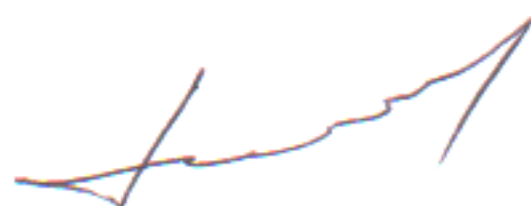
В данной работе был проведен анализ и освоение методов определения теплового сопротивления микросхем, приведенных в ОСТ 11 0944-96. В ходе работы с помощью моделирования в программе Synopsys TCAD было определено тепловое сопротивление микросхемы 124KT1. Разработан модифицированный метод определения теплового сопротивления микросхем. Разработаны программные решения блока управления в программной среде National Instruments LabVIEW. Приведены результаты моделирования, а именно значение теплового сопротивления микросхем.

К достоинствам работы можно отнести большой объем работы, проделанной в короткие сроки, рациональность решений по реализации системы управления сложным процессом измерения. Особо хочется отметить практическую значимость работы – разработанный управляемый источник тока может использоваться для испытания микросхем.

В целом изложение материала последовательное, работа написана четким и ясным языком. Графический материал выполнен с учетом всех предъявляемых требований.

Считаю, что выпускная квалификационная работа заслуживает оценки «отлично», а выпускник Панькин К. Ю. квалификации – магистр по направлению подготовки 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника».

Рецензент работы  
к.т.н., доцент



Ю. Б. Федотов