**«Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»**

**(БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова)**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | |  | |  | | ДОПУСКАЕТСЯ К ЗАЩИТЕ: | | | | | | | | | |
| **Факультет** | | И | | Заведующий кафедрой | | | | |  | | И2 | | |
|  | |  | |  | | | | |  | | шифр кафедры | | |
| **Выпускающая кафедра** | | И2 | | Марков А.В. | | |  |  | | | | | |
|  | |  | | Фамилия И.О. | | |  | подпись | | | | | | |
| **Группа** | | И242 | | «\_\_\_\_\_» | |  | | | | | | 2018 г. | |
|  |  | |  | |  | |  | | | | |  | | |

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

|  |  |
| --- | --- |
|  | |
| Фамилия, имя, отчество обучающегося | |
| **На тему** | Разработка методики входного контроля ЭКБ за счет |
| температурных шоковых воздействий | |
|  | |

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Направление подготовки** | 27.03.01 |  | Стандартизация и метрология |
|  | индекс направления |  | полное наименование направления |
|  | | |

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Консультант:** | | | | |  | | | |  | **Руководитель:** | | |  | | | | | | |
| при необходимости | | | | | подпись | | | |  |  | | | Подпись | | | | | | |
|  | | |  | |  | | | |  |  | | | | |  | |  | | |
| ученая степень, ученое звание | | | | | Фамилия ИО | | | |  | ученая степень, ученое звание | | | | | | Фамилия ИО | | | |
| « » |  |  | | | | |  | 2018г. |  | « » |  |  | | | | | |  | 2018г. |
|  | | | | | |  | | |  | **Обучающийся:** | | | |  | | | | | |
|  | | | |  | |  | | |  |  | | | | |  | |  | | |
|  | | | | | |  | | |  | подпись | | | | |  | | Фамилия ИО | | |
|  |  |  | | | | |  |  |  | « » |  |  | | | | | |  | 2018 г. |

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

2018 г.

# Реферат

Выпускная квалификационная работа объемом 43 страницы содержит 17 рисунков, 1 таблицу. Количество использованных источников – 15.

Ключевые слова: ЭЛЕКТРОННАЯ КОМПОНЕНТНАЯ БАЗА, ИСПЫТАНИЯ, МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ, ОБОРУДОВАНИЕ, ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА.

Объектом исследования является диод 2г401в, работа которого будет отслеживаться под влиянием шоковых температур.

Цель работы – разработка методики входного контроля ЭКБ за счет температурных шоковых воздействий.

Выпускная квалификационная работа состоит из 2 разделов:

В первом разделе производится анализ актуальности входного контроля электронной компонентной базы, а также рассматриваются основные физические определения.

Во втором разделе представлено оборудование необходимое для проведения исследования, представлены результаты испытаний.

Огл**авление**

[Реферат 2](#_Toc516687331)

[Нормативные ссылки 4](#_Toc516687333)

[Обозначения и сокращения 5](#_Toc516687334)

[Введение 6](#_Toc516687335)

[1 Актуальность разработки методики входного контроля ЭКБ за счет температурных шоковых воздействий 8](#_Toc516687336)

[1.1 Способы входного контроля ЭКБ 8](#_Toc516687337)

[1.1.1 Идентификация продукции 9](#_Toc516687338)

[1.1.2 Визуальная проверка 9](#_Toc516687339)

[1.1.3 Контроль качества маркировки 9](#_Toc516687340)

[1.1.4 Контроль массы и размера 10](#_Toc516687341)

[1.1.5 Проведение параметрического входного контроля в НУ 11](#_Toc516687342)

[1.1.6 Электрическая проверка 11](#_Toc516687343)

[1.1.7 Термотренировка 11](#_Toc516687344)

[1.2 Понятие температур 12](#_Toc516687345)

[1.3 Полупроводники и принцип их работы 13](#_Toc516687346)

[1.4 Принцип работы p-n-перехода 15](#_Toc516687347)

[1.4.1 P-n-переход при отсутствии внешнего напряжения 15](#_Toc516687348)

[1.4.2 P-n-переход при прямом включении 18](#_Toc516687349)

[1.4.3 P-n-переход при обратном включении 19](#_Toc516687351)

[1.5 Лавинный пробой 20](#_Toc516687353)

[1.6 Спектральная плотность мощности шума 21](#_Toc516687355)

[1.7 Дробовый шум 22](#_Toc516687357)

[2 Практические исследования 25](#_Toc516687358)

[2.1 Оборудование необходимое для проведения исследования 25](#_Toc516687359)

[2.2 Проведение экспериментов 33](#_Toc516687360)

[2.3 Выводы по разделу 40](#_Toc516687361)

[Заключение 41](#_Toc516687362)

[Список использованных источников 42](#_Toc516687363)

# 

# Нормативные ссылки

В выпускной квалификационной работе использованы ссылки на следующие нормативные документы:

ГОСТ РВ 20.57.416 «Комплексная система контроля качества. Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические военного назначения. Методы испытаний: гос. воен. стандарт»;

ГОСТ Р5 1293-99 «Идентификация продукции»;

ГОСТ РВ 0015-308 «Входной контроль изделий»;

ОСТ 11 073.013 «Микросхемы интегральные»;

ГОСТ 20.57.406 «Комплексная система контроля качества. Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические. Методы испытаний».

# Обозначения и сокращения

В выпускной квалификационной работе использованы следующие обозначения и сокращения:

ГОСТ - межгосударственный стандарт;

ГОСТ Р – национальный стандарт;

ИМС – интегральные микросхемы;

НТД – нормативно-техническая документация;

ЭКБ – электронная компонентная база;

НУ – нормальные условия;

ТУ – технические условия;

РЭА – радиоэлектронная аппаратура .

# Введение

Основой для создания радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) любого назначения является электронная компонентная база (ЭКБ). С каждым днем степень интеграции электронных компонентов увеличивается, а также увеличивается их сложность, затрудняет поиск и устранение неисправности. От того, насколько качественными и бездефектными будут ЭКБ, будет зависеть надежность и долговечность аппаратуры. Поэтому важно обеспечивать надлежащий контроль качества электронных комплектующих при их поступлении на производство.

В последнее время перед предприятиями радиоэлектронной промышленности особенно остро стоит проблема выявления качественных электронных компонентов. Если ранее случаи закупки некачественных компонентов для комплектации особо надежной аппаратуры были единичными, то за последние несколько лет их количество возросло многократно. Отказ бракованных электронных компонентов, установленных в особо надежную аппаратуру, применяемую в самолетостроении, в оборонной промышленности, в космической области или ядерной энергетике, может привести к катастрофическим последствиям, значительным экономическим потерям и человеческим жертвам.

Необходимым условием разработки эффективных предупреждающих действий, направленных на своевременное выявление некачественной продукции является достоверное установление его признаков, что позволяет определить набор современных аналитических методов, которые могут быстро и с высокой степенью достоверности сигнализировать о наличии факта брака.

В настоящее время отсутствуют отечественные стандарты, регламентирующие методы обнаружения фальсифицированной ЭКБ. Существующие методы отбраковки, применяемые при комплектации особо надежной аппаратуры, нацелены в первую очередь на отбраковку изделий ЭКБ, не соответствующих спецификации изготовителя, что фактически позволяет отбраковывать только полностью не функционирующие компоненты, или не проходящие по нормам на электрические параметры.

Системы обеспечений качества предприятия имеют свои нюансы. Однако без входного контроля не рискует обойтись ни один производитель электроники.

В этой связи особую актуальность приобретает разработка методики входного контроля электронных компонентов за счет температурных шоковых воздействий с применением современных методов физико-технического анализа для использования в рамках дополнительных и сертификационных испытаний ЭКБ, предназначенных для комплектации особо надежной аппаратуры.

1 Актуальность разработки методики входного контроля ЭКБ за счет температурных шоковых воздействий

## 1.1 Способы входного контроля ЭКБ

Накопленный за длительное время опыт применения ЭКБ позволяет отметить важную организационно-техническую составляющую, без которой применение ЭКБ становится серьезной проблемой для разработчиков,

изготовителей и потребителей РЭА, а именно - продуманную организацию и

обязательное проведение соответствующих входных испытаний.

Входной контроль представляет собой совокупность операций, связанных в определенную последовательность. Структура и содержание данной последовательности определяется утвержденной и согласованной в установленном порядке программой и методикой проведения испытаний.

|  |
| --- |
|  |

Входной контроль является дополнительной проверкой компонентов перед использованием их в производстве по параметрам, определяющим их работоспособность и надежность. Это вызвано тем, что отдельные элементы могут иметь пониженное качество из-за недобросовестного контроля на выходе, а также возможным продолжительным хранением готовых изделий на складе, сопровождающимся ухудшением качественных показателей. Так же встречаются случаи использования контрафактной продукции. Кроме того, не исключена возможность повреждения компонентов в процессе транспортировки и т. д. Проведение входного контроля необходимо для любых типов компонентов, начиная с резисторов и заканчивая интегральными микросхемами (ИМС).

Существует несколько основных методов входного контроля:

* идентификация продукции;
* визуальная проверка;
* контроль качества маркировки;
* контроль массы и размера;
* проведение параметрического входного контроля в НУ;
* электрическая проверка;
* термотренировка;

### 1.1.1 Идентификация продукции

Идентификация продукции проводится с целью защиты потребителя от использования поставок несоответствующей контрафактной продукции ненадлежащего качества. Идентификация изделий проводится в соответствии с требованиями ГОСТ Р5 1293-99 «Идентификация продукции» и ГОСТ РВ 0015-308 «Входной контроль изделий». Проводится оценка полноты сопроводительной документации, чтобы быть уверенными в правомерности поставляемой продукции. Информация, указанная в сопроводительной документации, сверяется с маркировками данных на изделии, проверяется соответствие шрифтов и способов маркировки. Помимо всего этого проверяется принадлежность всех изделий, поступивших на проверку, заявленным партиям.

### 1.1.2 Визуальная проверка

При визуальной проверке обращают внимание на наличие на компоненте (или на упаковке, в которой находятся компоненты) указанных и отчетливо видимых сведений о типе, номинале, допуске, технических условиях или сертификате, а также на отсутствие на изделии царапин, сколов, трещин, вмятин, коррозии. Визуальный осмотр является первичным, он не даст гарантии на то, что те элементы, которые были отобраны в результате осмотра, будут рабочими. Вдобавок ко всему, визуальный осмотр позволяет определить по внешним факторам, является ли проверяемый компонент поддельным или же он все-таки оригинальный.

### 1.1.3 Контроль качества маркировки

Контроль качества маркировки проводится с целью определения правильности содержания маркировки, ее разборчивостью, способом нанесения, осматривается размер и начертание шрифта, наличие пометок и специальных символов, которыми маркируется продукция. Контроль качества маркировки изделий проводится в соответствии с требованиями следующих нормативных документов:

* ГОСТ РВ 20.57.416 (метод 407 «Контроль качества маркировки») [1];
* ГОСТ 20.57.406 (метод 407 «Контроль качества маркировки»);
* ОСТ 11 073.013.

Контроль качества маркировки считается выдержавшей проверку и испытания, если она разборчива и целостна, соответствует образцам внешнего вида, а ее содержание соответствует требованиям документации производителя.

### 1.1.4 Контроль массы и размера

Проверка массы изделий проводится с целью определения соответствия фактической массы изделия и массы, указанной производителям в сопровождающей документации.

Измерения массы изделий проводятся на электронных весах с различными диапазонами измерений для наибольшей достоверности.

Контроль массы изделий проводится в соответствии с требованиями следующих нормативных документов:

* ГОСТ РВ 20.57.416 (метод 404 «Проверка массы»);
* ГОСТ 20.57.406 (метод 404 «Проверка массы») [2];
* ОСТ 11 073.013.

Проверка размеров изделий проводится с целью соответствия установочных и присоединительных размеров изделий, на соответствие требованиям документации производителя. Измерение размеров малогабаритных изделий может производится с помощью систем бесконтактных измерений.

Проверка размеров изделий и упаковки проводится в соответствии с требованиями следующих нормативных документов:

* ГОСТ РВ 20.57.416 (метод 404 «Проверка массы») ;
* ГОСТ 20.57.406 (метод 404 «Проверка массы») ;
* ОСТ 11 073.013.

### 1.1.5 Проведение параметрического входного контроля в НУ

Еще одним этапом входного контроля является проведение параметрического контроля в нормальных условиях, то есть оценка параметров – критериев годности ЭКБ на соответствие требованиям документации производителя. Для оценивания пригодности изделий выбираются критерии и параметры, которые наибольшим образом характеризуют функциональное соответствие изделия и максимально критичные к последующим воздействиям.

Параметрический контроль проводится при нормальных климатических условиях:

* температура воздуха: от 15 до 35 ˚С;
* относительная влажность воздуха: от 45 до 75%;
* атмосферное давление: от 86 до 106 кПа (от 645 до 795 мм. рт. ст.).

Прошедшими входной контроль считаются те изделия, параметры – критерии которых удовлетворяют всем требованиям, которые установлены в методике проведения входного контроля и сертификационных испытаний.

### 1.1.6 Электрическая проверка

При электрической проверке удостоверяются в соответствии электрических параметров компонентов данным, указанным в пунктах требований и методик технических условий или сертификатов. Компоненты, прошедшие входной контроль посредством электрической проверки, дополнительно маркируются отличительным знаком, что позволяет продвинуться к следующему типу входного контроля [3].

### 1.1.7 Термотренировка

*Термотренировка* позволяет выявить ряд несовершенств конструкции и нарушения технологии при изготовлениях компонентов. В ходе испытаний выявляют, как ведут себя компоненты при повышенных и пониженных температурах.

При проведении подобных дополнительных испытаний критериями оценки партий ЭКБ служат:

* выход параметров ЭКБ за нормы ТУ в нормальных климатических условиях и при крайних значениях температур;
* выход параметров ЭКБ, не входящих в ТУ, но являющихся критериями для выявления потенциально ненадежных изделий, за требуемые нормы.

## 1.2 Понятие температур

Работа компонентной базы приборов напрямую подвержена воздействию со стороны окружающей ее среды, в частности температуры. Зачастую появляется необходимость использования техники в экстремальных условиях повышенных и пониженных температур.

Для того, чтобы понять как температура оказывает свое воздействие на работу ЭКБ, следует разобраться с ее понятием, какую физику она имеет.

*Температура* – это скалярная физическая величина, которая характеризует состояние термодинамического равновесия макроскопической системы. Температура всех частей системы, находящейся в равновесии, одинакова. В ином случае в системе происходит передача энергии от более нагретых частей системы к менее нагретым, приводящая к выравниванию температур в системе, и говорят о распределении температуры в системе или скалярном поле температур [4].

Для того чтобы оценить как ведет себя ЭКБ под воздействиями температур, в качестве входного контроля проводят испытания повышенными и пониженными температурами.

Испытания высокими температурами проводятся для проверки изделий, а конкретнее их параметров и внешнего вида. Под воздействием повышенной температуры у объектов испытаний могут быть следующие проявления:

* образуются трещины в изоляционных материалах;
* уменьшается сопротивление проводников и изоляторов;
* увеличивается вероятность электрических пробоев;
* подвержена нарушению герметичность изделий, в результате разрушения изолирующих покрытий.

Помимо всего этого повышенная температура помогает выявить потенциально не надежные изделия, нарушение работоспособности которых проявляются на границах рабочего температурного диапазона.

Помимо проверки высокими температурами, проводят проверку и пониженными температурами, которые позволяют выявлять следующие факторы:

* при низких температурах пластмассовые корпуса теряют эластичность;
* резиновые части изделия становятся хрупкими и подвержены растрескиванию;
* металлы становятся ломкими;
* деформируются корпуса и увеличиваются зазоры.

## 1.3 Полупроводники и принцип их работы

Полупроводники, из которых изготавливают транзисторы и диоды, разделяются на полупроводники с электронной – n (negative – отрицательный) и дырочной – p (positive – положительный) проводимостью.

Полупроводник n-типа имеет примесную природу и проводит электрический ток подобно металлам. Примесные элементы, которые добавляют в полупроводники для получения полупроводников n-типа, называются донорными.

Полупроводник p-типа, кроме примесной основы, характеризуется дырочной природой проводимости. Примеси, которые добавляют в этом случае, называются акцепторными.

*Акцепторные примеси* – примеси в полупроводнике, ионизации которой сопровождаются захватом из донорной примеси или из валентной зоны.

Зоной p-n перехода называется область полупроводника, в которой имеет место пространственное изменение типа проводимости от электронной n к дырочной p.

Достоинства полупроводниковых элементов:

* сравнительно небольшие масса и габариты;
* долгий срок службы и надежность;
* высокая экономичность (низкая стоимость, возможность работать при низких напряжениях питания);
* позволяют создавать в малых размерах электронные схемы;
* большая механическая прочность.

Недостатки полупроводниковых элементов:

* разброс характеристик и параметров у приборов одного типа;
* зависимость параметров и свойств от температуры;
* процесс старения;
* наличие собственных шумов;
* под воздействием ионизирующего излучения работа многих полупроводников заметно ухудшается.

Полупроводники занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками по электрической проводимости. При низких температурах полупроводники – диэлектрики. При нормальной (комнатной) температуре – проводники, за счет дополнительной (тепловой) энергии электроны преодолевают запрещенную зону и переходят из валентной зоны в зону проводимости, тем самым электропроводность возрастает. Именно поэтому полупроводники работают при нормальной температуре.

    Принцип действия полупроводниковых приборов объясняется свойствами так называемого электронно-дырочного перехода (p-n - перехода) - зоной раздела областей полупроводника с разным механизмами проводимости [5]. 

1.4 Принцип работы p-n-перехода

### 1.4.1 P-n-переход при отсутствии внешнего напряжения

Электронно-дырочным или p-n-переходом называют область, возникающую на границе двух полупроводников с различными типами электропроводности.

Рассмотрим вариант, когда внешнее напряжение на переходе отсутствует. Так как носители заряда в каждом полупроводнике совершают хаотичное тепловое движение, то они обладают собственными скоростями, отсюда происходит их диффузия из одного полупроводника в другой.

*Диффузией* называется процесс, при котором молекулы или атомы одного вещества проникают между атомами или молекулами другого вещества, что приводит к самопроизвольному выравниванию их концентраций по всему занимаемому ими объему. Для наглядности процесс диффузии представлен на рисунке 1.

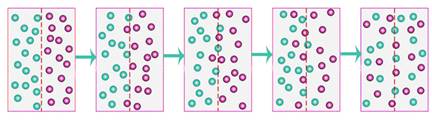


Рисунок 1 ­– Процесс диффузии.

Как и при любой другой диффузии, носители перемещаются оттуда, где их концентрация больше, туда, где их концентрация меньше. Таким образом, из полупроводника n-типа в полупроводник p-типа диффундируют электроны, а в обратном направлении - дырки.

В результате диффузии носителей по обе стороны границы раздела двух полупроводников с различным типом электропроводности создаются объемные заряды разноименных знаков. В области n создается положительный объемный заряд. Он образован главным образом положительно заряженными атомами донорной примеси и в небольшой степени - пришедшими в эту область дырками. Аналогично в области p [6].

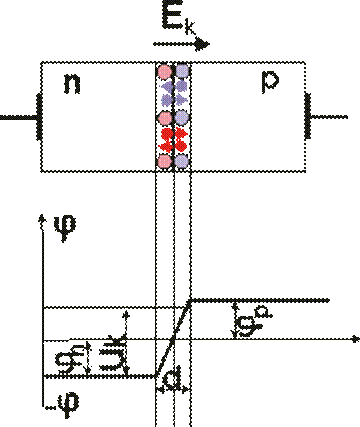


Рисунок 2 – Электронно-дырочный переход при отсутствии внешнего напряжения

Между образовавшимися объемными зарядами возникает так называемая контактная разность потенциалов и электрическое поле (вектор напряженности Ek).

Формула разности потенциалов представлена ниже:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | , | (1) |

где Uk – разность потенциалов, .

Следует отметить, что объемные заряды возникают вблизи границы n- и p-областей, а положительный потенциал φn или отрицательный потенциал φp создается одинаковым по всей области n или p. В случае если бы в различных частях области потенциал был различным, т. е. была бы разность потенциалов, то возник бы ток, в результате которого все равно произошло бы выравнивание потенциала в данной области. Нужно помнить, что заряд и потенциал имеют разный физический смысл. Там, где есть электрический потенциал, не обязательно должен быть заряд

Как видно, в p-n-переходе возникает потенциальный барьер, препятствующий диффузионному переходу носителей. На рисунке 2 (нижняя часть рисунка, диаграмма) изображен барьер для электронов, стремящихся за счет диффузии перемещаться слева направо (из области n в область p).

Высота барьера равна контактной разности потенциалов и обычно составляет десятые доли вольта. Чем больше концентрация примесей, тем выше концентрация базовых носителей и тем большее число их диффундирует через границу. Плотность объемных зарядов возрастает, и увеличивается контактная разность потенциалов uk, т. е. высота потенциального барьера. При этом толщина p-n-перехода d уменьшается, так как соответствующие заряды образуются в приграничных слоях меньшей толщины.

Одновременно с диффузионным перемещением базовых носителей через границу происходит и обратное перемещение носителей под действием электрического поля контактной разности потенциалов. Это поле перемещает дырки из n-области обратно в p-область и аналогично электроны из p-области обратно в n-область. При постоянной температуре p-n-переход находится в состоянии динамического равновесия. Ежесекундно через границу в противоположных направлениях перемещаются электроны и дырки, а под действием поля столько же их дрейфует в обратном направлении.

Полный ток через переход при динамическом равновесии равен нулю, так как диффузионный ток и ток дрейфа компенсируют друг друга. В случае если диффузионный ток возрастет, то через переход будет диффундировать больше носителей. Это вызовет увеличение объемных зарядов и потенциала по обе стороны границы. Значение  возрастет, т. е. усилится электрическое поле в переходе и повысится потенциальный барьер. Но усиление поля вызовет соответствующее увеличение тока дрейфа, т. е. обратного перемещения носителей. Пока диффузионный ток больше тока дрейфа высота барьера растет, но в конце концов за счет увеличения тока дрейфа наступит равенство токов и дальнейшее повышения барьера прекратится.

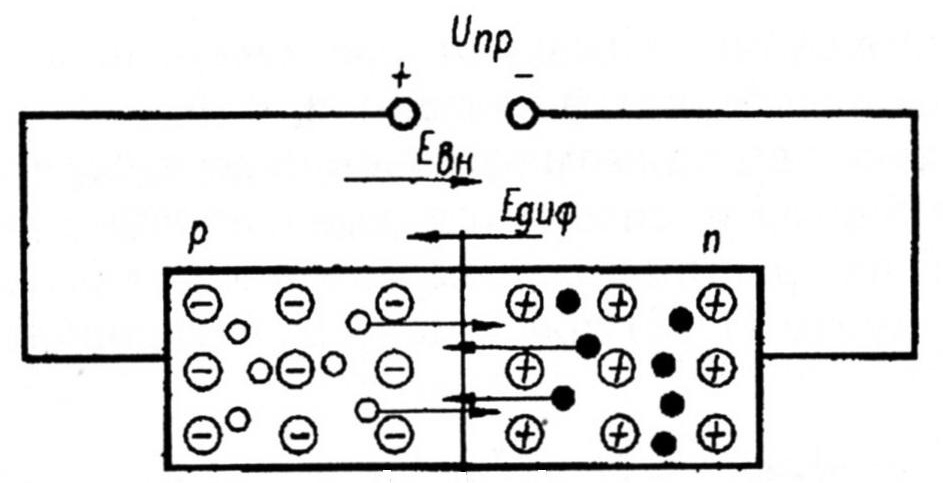
В p-n-переходе концентрация электронов плавно меняется (относительно границы полупроводников). Меняется также и концентрация дырок. В результате этого в средней части перехода образуется слой с малой концентрацией носителей - так называемый обедненный носителями слой. Соответственно и удельная проводимость будет во много раз меньше, чем в остальных частях n и p. Помимо этого можно рассматривать слой, обедненный подвижными носителями, как результат действия электрического поля контактной разности потенциалов. Это поле "выталкивает" из пограничных слоев подвижные носители: электроны перемещаются в область n, а дырки в область p. Это ответ на вопрос, почему электроны, обладающие отрицательным зарядом, не рекомбинируют с дырками, обладающих положительным зарядом. Поле просто напросто их "раздвигает".

Таким образом, в p-n-переходе возникает слой, называемый запирающим и обладающий большим сопротивлением по сравнению с сопротивлением остальных объемов n- и p-полупроводников [7].

### 1.4.2 P-n-переход при прямом включении

При использовании p-n-перехода в реальных полупроводниковых приборах к нему может быть приложено внешнее напряжение. Величина и полярность этого напряжения определяют поведение перехода и проходящий через него электрический ток. Если положительный полюс источника питания подключается к p-области, а отрицательный – к n-области, то включение p-n-перехода называют прямым. При изменении указанной полярности включение p-n-перехода называют обратным.

При прямом включении p-n-перехода внешнее напряжение создает в переходе поле, которое противоположно по направлению внутреннему диффузионному полю, рисунок 2. Напряженность результирующего поля падает, что сопровождается сужением запирающего слоя. В результате этого большое количество основных носителей зарядов получает возможность диффузионно переходить в соседнюю область (ток дрейфа при этом не изменяется, поскольку он зависит от количества неосновных носителей, появляющихся на границах перехода), т.е. через переход будет протекать результирующий ток, определяемый в основном диффузионной составляющей. Диффузионный ток зависит от высоты потенциального барьера и по мере его снижения увеличивается экспоненциально.

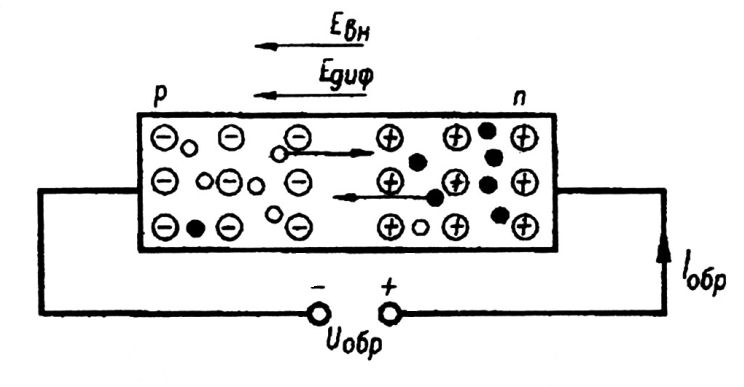


## Рисунок 3 – Прямое включение p-n перехода

Повышенная диффузия носителей зарядов через переход приводит к повышению концентрации дырок в области n-типа и электронов в области p-типа. Такое повышение концентрации неосновных носителей вследствие влияния внешнего напряжения, приложенного к переходу, называется инжекцией неосновных носителей. Неравновесные неосновные носители диффундируют вглубь полупроводника и нарушают его электронейтральность. Восстановление нейтрального состояния полупроводника происходит за счет поступления носителей зарядов от внешнего источника. Это является причиной возникновения тока во внешней цепи, называемого прямым [8].

### 1.4.3 P-n-переход при обратном включении

При включении p-n-перехода в обратном направлении внешнее обратное напряжение создает электрическое поле, совпадающее по направлению с диффузионным, что приводит к росту потенциального барьера и увеличению ширины запирающего слоя, рисунок 3. Все это уменьшает диффузионные токи основных носителей. Для неосновных носителей поле в p-n-переходе остается ускоряющим, и поэтому дрейфовый ток не изменяется.



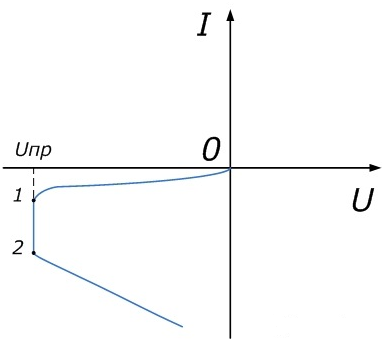
## Рисунок 4 – Обратное включение p-n перехода

Таким образом, через переход будет протекать результирующий ток, определяемый в основном током дрейфа неосновных носителей. Поскольку количество дрейфующих неосновных носителей не зависит от приложенного напряжения (оно влияет только на их скорость), то при увеличении обратного напряжения ток через переход стремится к предельному значению IS , которое называется током насыщения. Чем больше концентрация примесей доноров и акцепторов, тем меньше ток насыщения, а с увеличением температуры ток насыщения растет по экспоненциальному закону [8].

## 1.5 Лавинный пробой

*Лавинный пробой* – возникает в широком [электронно-дырочном переходе](http://electroandi.ru/elektronika/elektronno-dyrochnyj-perekhod.html). Неосновные носители заряда, ускоряются большим обратным напряжением и приобретают значительную энергию, которой хватает, чтобы столкнувшись с атомами кристаллической решетки, оторвать валентные электроны. Электрон, уходя со своего места, создает дырку. И вновь созданные носители снова ускоряются полем и также отрывают другие электроны. Процесс происходит лавинообразно. Отсюда название пробоя [9].

Под пробоем p-n-перехода понимают значительное уменьшение обратного сопротивления, сопровождающееся возрастанием обратного тока при увеличении приложенного напряжения. Для наглядности пробой изображен в виде перехода 1-2 на рисунке 6.



## Рисунок 5 – пробой

## 1.6 Спектральная плотность мощности шума

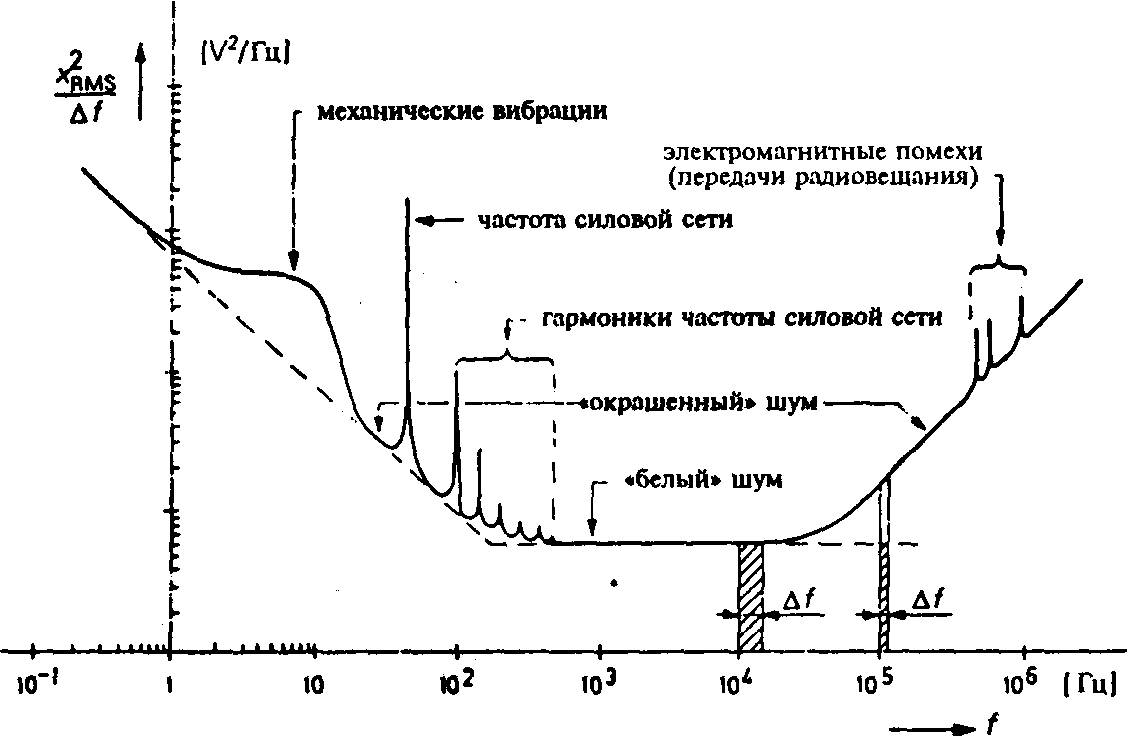
Спектральная плотность мощности шума.

Для описания шумов вводят понятие спектральной плотности мощности (СПМ) шума

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | Вт/Гц, | (2) |

где ΔP (f) - усредненная по времени мощность шума в полосе частот Δf на частоте измерения f.

На рисунке 5 представлена схема спектрального распределения источников колебаний.



## Рисунок 6 – Схема спектрального распределения источников колебаний

## 1.7 Дробовый шум

Дробовые шумы являются преобладающими для большинства полупроводниковых приборов. Основным источником дробовых шумов является p-n-переход. При прохождении носителей заряда над потенциальным барьером перехода возникают флуктуации дрейфовой и диффузионной составляющих токов вследствие хаотичности теплового движения носителей и флуктуации высоты потенциального барьера. Это явление аналогично флуктуациям тока эмиссии электронов, поэтому оно также называется дробовым эффектом.

*Дробовый эффект* – это небольшие беспорядочные отклонения анодного тока электровакуумных и полупроводниковых приборов от его среднего значения, вызванные неравномерностью эмиссии (испускания) электронов с катода или неравномерностью диффузии носителей тока в полупроводниках.

Однако прежде чем покинуть катод, электрон испытывает огромное число столкновений с атомами и др. электронами внутри катода, в результате чего величина и направление скорости каждого электрона в момент вылета из катода могут быть различными. Поэтому вылет отдельных электронов происходит как бы совершенно случайно и независимо от вылета др. электронов. Это приводит к тому, что число электронов, эмитированных катодом за одинаковые малые промежутки времени, оказывается различным, вследствие чего ток эмиссии испытывает случайные отклонения от своего среднего значения (флуктуации). Величина флуктуаций анодного тока существенно зависит от режима работы прибора [10].

**1.8 Выводы по разделу**

В заключении данного раздела можно отметить следующие достигнутые результаты.

Проведен анализ актуальности входного контроля ЭКБ. Изучены методы входного контроля ЭКБ. Частично была рассмотрена нормативно-техническая документация, в рамках которой проводится входной контроль ЭКБ.

Удалось детально разобраться в основных физических понятиях, процессах и терминах, которые рассматриваются в рамках выполнения данной выпускной квалификационной работы.

# 2 Практические исследования

## 2.1 Оборудование необходимое для проведения исследования

Целью данной работы является разработка методики входного контроля ЭКБ за счет температурных шоковых воздействий.

В качестве основы для эксперимента была выбрана партия шумовых диодов типа 2г401в в количестве 100 штук. Диод 2г401в изображен на рисунке 7, а на рисунке 8 представлена схема и размеры диода.

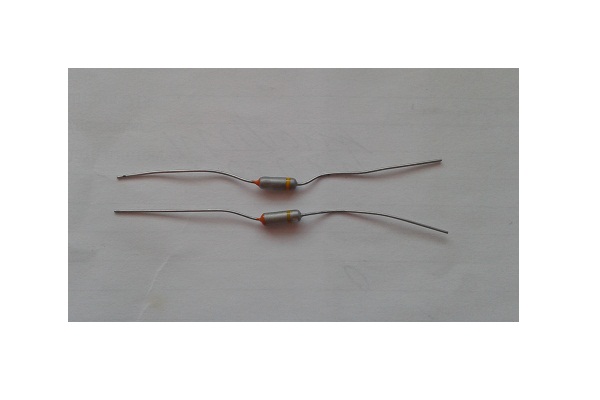


Рисунок 7 – Шумовой диод 2г401в

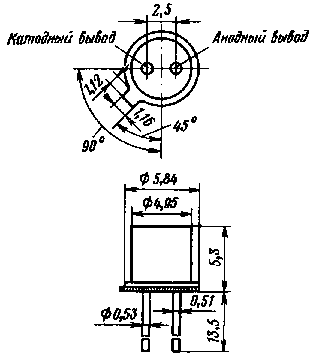


Рисунок 8 – Схема диода 2г401в

Рассматриваемый в качестве подопытного диод предназначен для генерирования шумов на частотах до 3.5 МГц.

Диод выпускается в металлостеклянном корпусе с гибкими выводами. Тип диода указан на корпусе. Положительный вывод диода маркируется красной точкой [11].

Примечания:

* Нижняя граница диапазона частот при неравномерности спектральной плотности напряжения шума на уровне ±3 дБ 20 Гц;
* Рекомендуемый режим работы генератора шума: ток через генератор шума 50 ± 10 мкА; сопротивление нагрузочного резистора, включенного последовательно с генератором шума, не менее 100 кОм; входное сопротивление и емкость между точками схемы, к которым подключается генератор шума, — не менее 20 кОм и не более 20 пФ соответственно;
* При изменении тока через генератор шума на 5 мкА (на 10 мкА) от номинального тока 50 мкА спектральная плотность напряжения шума изменяется примерно на 2% (5%), а граничная частота - на 8% (18%) значений при номинальном токе.
* Температурный коэффициент напряжения пробоя около 0,06%/К.

В качестве оценочной характеристики замерялась спектральная плотность шума диода. Для того, чтобы произвести измерения плотности шума, необходимо специальное оборудование. Для этих целей был использован селективный микровольтметр SMV -11, изображенный на рисунке 9.

*Селективный микровольтметр* типа SMV-11 представляет собой однополосный приемник для частот от 9 кГц до 30 МГц. Он разработан для селективного измерения синусоидальных высокочастотных напряжений и для квазипикового измерения импульсообразных напряжений помех. Без дополнительных принадлежностей селективный микровольтметр типа SMV-11 приспособлен для обычного селективного измерения напряжений в пределах от -30дБ до 80дБ. Его высокая динамическая избирательность и достаточно эффективные фильтры промежуточной частоты обеспечивают измерение небольших напряжений вблизи сильных посторонних сигналов. 4 вида показаний, 3 полосы пропускания по высокой частоте и ряд измерительных выходов, значительно облегчают обработку измерительных сигналов. В качестве антенны может использоваться практически любая конструкция, имеющая вход 50 Ω(Ом).

Главная область применения селективного микровольтметра типа SMV-11 является техника измерения помех в соответствии с действующими правилами и стандартами. Главными потребителями являются промышленность и отечественные государственные организации, использующие прибор для соблюдения и контроля правил по электромагнитной совместимости приборов и установок.



Рисунок 9 – Селективный микровольтметр SMV 11

Для того, чтобы отработать методику воздействия входного контроля методами воздействия шоковыми температурами, их необходимо воссоздать. Для воссоздания экстремально низких и высоких температур необходимо использование шоковых камер [12].

*Шоковые камеры*

Огромное количество радиоэлектронной аппаратуры сегодня используется в суровых климатических условиях (военная, авиакосмическая, автомобильная техника и т.д.). Поэтому самое пристальное внимание при производстве РЭА уделяется ее способности противостоять воздействию окружающей среды. Это касается не только перепада температур и изменения уровня влажности, но и десятка других показателей (давление, вибрация, радиация, трение, скорость, механические удары, воздействие реактивов и многое другое). Поэтому важную роль в обеспечении качества РЭА играют испытания. Только после проведения ряда испытаний можно вынести оценку долговечности и работоспособности радиоэлектронных компонентов. Испытания на воздействие перепада температур и тепловой удар обеспечивают шоковые камеры, изображенные на рисунке 10.



Рисунок 10 – Современные модели шоковых температурных камер

В отличие от камер шоковой заморозки, которые обеспечивают быстрое охлаждение продуктов, камеры термоудара создают температурное циклирование с высокой скоростью изменения температур.  Для проведения испытания образец помещают в корзину, которая перемещается то в тепло, то в холод. Благодаря конструктивным особенностям термошоковых камер, можно одновременно поддерживать разную температурную среду в двух или трёх рабочих зонах.

Для проведения шоковых температурных испытаний используется разная среда: жидкость-жидкость, воздух-воздух. Диапазон температур от - 80°С  до +220°С. Зоны могут располагаться горизонтально или вертикально. Данные испытания можно рассматривать, как ускоренные, важно только правильно выбрать диапазон изменения температур и скорость нагрева [13].

В качестве имитации шоковых температурных воздействий, применялся лабораторный стенд термоиспытаний, в качестве охлаждающего элемента, которого используется элемент пельтье.

*Элемент Пельтье* — это [термоэлектрический преобразователь](https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%A2%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%BE%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D0%BF%D1%80%D0%B5%D0%BE%D0%B1%D1%80%D0%B0%D0%B7%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C&action=edit&redlink=1), принцип действия которого базируется на [эффекте Пельтье](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D1%84%D1%84%D0%B5%D0%BA%D1%82_%D0%9F%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D1%82%D1%8C%D0%B5) — возникновении разности температур при протекании электрического тока.

Современные модули представляет собой конструкцию, состоящую из двух пластин-изоляторов (как правило, керамических), с расположенными между ними последовательно соединенными термопарами. С упрощенной схемой такого элемента можно ознакомиться на представленном ниже рисунке 11.

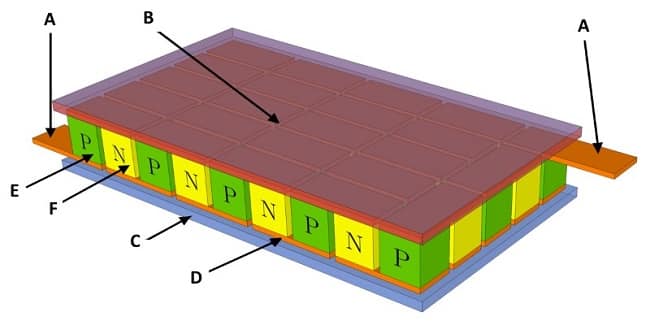


Рисунок 11 – Устройство модуля пельтье

Обозначения рисунка:

* А – контакты подключения к источнику питания
* B – горячая поверхность элемента
* C – холодная сторона
* D – медные проводники
* E – полупроводник на основе p-перехода
* F – полупроводник n-типа

Конструкция выполнена таким образом, что каждая из сторон модуля контактирует либо p-n, либо n-p переходами (в зависимости от полярности). Контакты p-n нагреваются, n-p – охлаждаются (смотри рисунок 12). Соответственно, возникает разность температур (DT) на сторонах элемента. Для наблюдателя этот эффект будет выглядеть, как перенос тепловой энергии между сторонами модуля. Примечательно, что изменение полярности питания приводит к смене горячей и холодной поверхности [14].

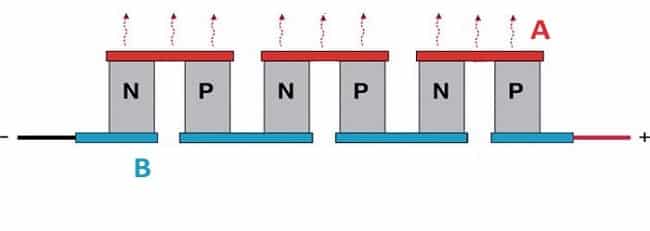


Рисунок 12 – Схема устройства элемента пельтье

Обозначения:

* A – горячая сторона элемента
* B – холодная сторона элемента

Для проведения эксперимента использовался стенд термоиспытаний программируемый МК-2, изображенный на рисунке 13.



Рисунок 13 – Стенд термоиспытаний программируемый МК-2

Основной частью испытательного стенда является холодильная установка. Основной принцип действия установки заключается в переходе от отрицательной к положительной температуре, при сохранении режима термостабилизации, то есть обеспечивается неинерционность системы [15].

## 2.2 Проведение экспериментов

Для того, что произвести исследования на тему того, как влияют шоковые температурные изменения на работу диода 2г401в, была собрана следующая установка, схема которой представлена на рисунке 14.

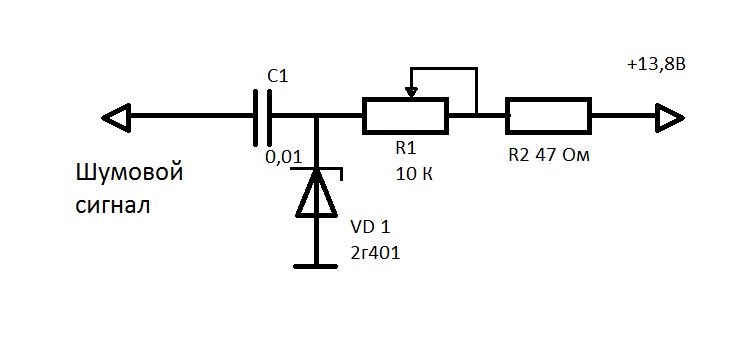


Рисунок 14 – Схема собранной установки

Как видно из схемы использовались следующие компоненты:

* Конденсатор, емкость которого составила 0.01 микрофарада
* Резистор 1, сопротивление которого было 10 кОм
* Резистор 2, сопротивление которого было 47 Ом
* Питание на установку подавалось 13,8 Вольт
* Диод 2г401в

Для снятия показаний спектрального шума диода использовался селективный микровольтметр SMV 11. Частота селлективного приемника была настроена на 1Мгц. Полоса пропускания была выставлена на 9кГц.

Для изменения температур использовался стенд термоиспытаний программируемый МК-2.

Заявленный нижний предел спектральной плотности шума диода составлял мкВ/= 120, согласно ТУ.

Чтобы убедиться в работоспособности диодов, были проведены замеры спектрального шума при комнатной температуре 21С0. При данной температуре нарушений в работоспособности не было выявлено, все диоды прошли проверку.

После проведения испытаний в НУ была установлена температура в +50С0.

При воздействии высокой температурой в +50С0 было выявлено, что 28 диодов не прошли испытания, так как спектральная плотность шума была ниже заявленного предела. На рисунке 15 видно, какое число диодов оказалось нерабочими по отношению к общему количеству.

Рисунок 15 – График результата испытаний при температуре +50С0

После проведения испытаний при температуре в +50С0, была установлена температура в -60С0.

При воздействии отрицательной температурой в -60 С0, наблюдалось что испытания не проходят 17 диодов, спектральная плотность шума была так же ниже заявленного предела. На рисунке 16 видно, какое число диодов оказалось нерабочими по отношению к общему количеству.

Рисунок 16 – График результата испытаний при температуре -60С0

По итогам всех полученных данных была построена таблица, в которой отображено количество нерабочих диодов и выдаваемая ими спектральная плотность шума.

Таблица 1 – Спектральная плотность шума при различных температурах

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| № | **Нормальные условия** | **+50С0** | **-60С0** | **Годен/ Не Годен** |
|  | Спектральная плотность шума, . мкВ/ |
| 1 | 152 | 230 | 125 | Годен |
| 2 | 198 | 112 | 101 | Не Годен |
| 3 | 178 | 156 | 198 | Годен |
| 4 | 201 | 211 | 236 | Годен |
| 5 | 265 | 102 | 298 | Не Годен |
| 6 | 175 | 185 | 105 | Не Годен |
| 7 | 298 | 300 | 102 | Не Годен |
| 8 | 259 | 263 | 296 | Годен |
| 9 | 179 | 180 | 184 | Годен |
| 10 | 200 | 103 | 233 | Не Годен |
| 11 | 300 | 298 | 112 | Не Годен |
| 12 | 289 | 115 | 300 | Не Годен |
| 13 | 274 | 207 | 261 | Годен |
| 14 | 150 | 299 | 227 | Годен |

Продолжение таблицы 1

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 15 | 187 | 104 | 222 | Не Годен |
| 16 | 195 | 289 | 203 | Годен |
| 17 | 163 | 155 | 286 | Годен |
| 18 | 263 | 165 | 111 | Не Годен |
| 19 | 275 | 175 | 184 | Годен |
| 20 | 298 | 185 | 163 | Годен |
| 21 | 278 | 188 | 154 | Годен |
| 22 | 269 | 195 | 105 | Не Годен |
| 23 | 274 | 300 | 175 | Годен |
| 24 | 176 | 261 | 298 | Годен |
| 25 | 152 | 227 | 259 | Годен |
| 26 | 201 | 105 | 179 | Не Годен |
| 27 | 211 | 100 | 200 | Не Годен |
| 28 | 232 | 261 | 300 | Годен |
| 29 | 166 | 227 | 102 | Не Годен |
| 30 | 156 | 222 | 274 | Годен |
| 31 | 155 | 203 | 150 | Годен |
| 32 | 150 | 96 | 187 | Не Годен |
| 33 | 300 | 196 | 195 | Годен |
| 34 | 233 | 104 | 163 | Не Годен |
| 35 | 218 | 163 | 263 | Годен |
| 36 | 177 | 103 | 275 | Не Годен |
| 37 | 174 | 284 | 298 | Годен |
| 38 | 185 | 112 | 278 | Не Годен |
| 39 | 196 | 198 | 109 | Не Годен |
| 40 | 163 | 92 | 274 | Не Годен |
| 41 | 152 | 245 | 176 | Годен |
| 42 | 154 | 274 | 152 | Годен |
| 43 | 162 | 100 | 201 | Не Годен |
| 44 | 159 | 87 | 211 | Не Годен |
| 45 | 274 | 195 | 232 | Годен |
| 46 | 285 | 163 | 166 | Годен |
| 47 | 296 | 263 | 155 | Годен |
| 48 | 269 | 113 | 275 | Не Годен |
| 49 | 258 | 298 | 175 | Годен |
| 50 | 247 | 278 | 185 | Годен |

Продолжение таблицы 1

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 51 | 236 | 269 | 188 | Годен |
| 52 | 214 | 274 | 119 | Не Годен |
| 53 | 278 | 150 | 300 | Годен |
| 54 | 289 | 187 | 261 | Годен |
| 55 | 267 | 115 | 227 | Не Годен |
| 56 | 294 | 163 | 222 | Годен |
| 57 | 283 | 195 | 203 | Годен |
| 58 | 216 | 161 | 99 | Не Годен |
| 59 | 222 | 150 | 201 | Годен |
| 60 | 150 | 101 | 291 | Не Годен |
| 61 | 251 | 198 | 256 | Годен |
| 62 | 207 | 178 | 237 | Годен |
| 63 | 299 | 201 | 194 | Годен |
| 64 | 154 | 265 | 100 | Не Годен |
| 65 | 289 | 175 | 256 | Годен |
| 66 | 155 | 91 | 258 | Не Годен |
| 67 | 165 | 259 | 269 | Годен |
| 68 | 175 | 109 | 195 | Не Годен |
| 69 | 185 | 200 | 161 | Годен |
| 70 | 188 | 300 | 94 | Годен |
| 71 | 195 | 108 | 151 | Не Годен |
| 72 | 300 | 259 | 274 | Годен |
| 73 | 261 | 179 | 150 | Годен |
| 74 | 227 | 200 | 107 | Не Годен |
| 75 | 222 | 300 | 195 | Годен |
| 76 | 203 | 289 | 163 | Годен |
| 77 | 286 | 124 | 263 | Не Годен |
| 78 | 196 | 150 | 275 | Годен |
| 79 | 184 | 187 | 152 | Годен |
| 80 | 163 | 95 | 198 | Не Годен |
| 81 | 154 | 163 | 178 | Годен |
| 82 | 284 | 263 | 201 | Годен |
| 83 | 211 | 275 | 116 | Не Годен |
| 84 | 159 | 85 | 175 | Не Годен |
| 85 | 168 | 88 | 298 | Не Годен |
| 86 | 193 | 102 | 259 | Не Годен |

Продолжение таблицы 1

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 87 | 191 | 156 | 179 | Годен |
| 88 | 201 | 111 | 200 | Не Годен |
| 89 | 291 | 275 | 201 | Годен |
| 90 | 256 | 118 | 185 | Не Годен |
| 91 | 237 | 300 | 236 | Годен |
| 92 | 194 | 263 | 298 | Годен |
| 93 | 300 | 123 | 180 | Не Годен |
| 94 | 256 | 203 | 102 | Не Годен |
| 95 | 258 | 298 | 296 | Годен |
| 96 | 269 | 251 | 184 | Годен |
| 97 | 195 | 115 | 233 | Не Годен |
| 98 | 161 | 299 | 112 | Не Годен |
| 99 | 150 | 300 | 130 | Годен |
| 100 | 151 | 156 | 103 | Не Годен |

По данным таблицы видно, что в ходе проведения эксперимента были выявлены образцы, которые не прошли проверку шоковыми температурами. Больше всего нарушений в работе диодов выявлено в режиме испытания температурой +50 С0 , число неправильно работающих диодов достигло 28 штук, что является существенным, это почти 30% от общего количества.

При проведении испытания с отрицательной температурой в -60 С0, наблюдалось что испытания не проходят 17 диодов, что тоже является существенным количеством некорректно работающих диодов.

Для наглядности всех полученных данных была построена диаграмма, изображенная на рисунке 17, на которой видно, общее соотношение нерабочих и рабочих диодов.

Рисунок 17 – График интенсивности отказов

По данным полученного графика можно увидеть, что после проведения всех испытаний, рабочими и пригодными для дальнейшего использования можно считать лишь 55 диодов, так как они прошли все испытания, и показания спектрального шума находилось в допуске согласно ТУ.

## 2.3 Выводы по разделу

В заключении практического раздела можно отметить следующие достигнутые результаты.

Была сформирована методика входного контроля ЭКБ за счет температурных шоковых воздействий. По этой методике были проведены испытания партии диодов 2г401в в количестве 100 штук. По итогам испытаний было выявлено, что из всей партии в 100 штук некорректно работающими оказались 45 диодов, их спектральная плотность шума была ниже заявленной производителем в ТУ.

Метод входного контроля ЭКБ за счет температурных шоковых воздействий является актуальным для производителей радиоэлектронной аппаратуры. Он позволяет быстро выявить контрафактную продукцию, а так же продукцию, в ходе изготовления которой происходило нарушение технического процесса, так как на тестирование одного образца уходит не более 2 минут.

Так как метод основан на p-n-переходе, он может применяться не только для тестирования диодов, но и для исследований микросхем на различные функциональные тесты.

# Заключение

Для достижения поставленной цели ВКР последовательно были выполнены следующие этапы:

* обоснована актуальность проведения исследования входного контроля ЭКБ за счет температурных шоковых воздействий ;
* проанализированы способы входного контроля;
* разработана методика входного контроля ЭКБ за счет температурных шоковых воздействий;
* рассмотрено оборудование для проведения эксперимента;
* проведены испытания 100 образцов;
* выполнена оценка значимости входного контроля за счет температурных шоковых воздействий;

# Список использованных источников

1. ГОСТ РВ 20.57.416 «Контроль качества маркировки» [Электронный ресурс] - [http://cryo-tech.ru/wp-content/library/standarts/gost/RV20.57.306-98.pdf - дата обращения 18.05.2018](http://cryo-tech.ru/wp-content/library/standarts/gost/RV20.57.306-98.pdf%20-%20дата%20обращения%2018.05.2018)г.
2. ГОСТ 20.57.406 ««Проверка массы» [Электронный ресурс] - <http://docs.cntd.ru/document/1200016473> - дата обращения 18.05.2018г.
3. Надежность и качество сложных систем [Электронный ресурс] - <https://nikas.pnzgu.ru/> - дата обращения 20.05.2018г.
4. Температура [Электронный ресурс] - <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D0%BC%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%82%D1%83%D1%80%D0%B0> – дата обращения 20.05.2018г.
5. Курс физики: Учебник для ВУЗов / А.Н. Реми, Ремизов А.Н. – дрофа 2002.
6. Диффузия: Учебно-методическое пособие по курсу Общая физика / П.В.Попов – Москва МФТИ, 2016.
7. Изучение p-n-перехода на полупроводниковых диодах: Лабораторный практикум / С.А.Киров, С.В.Колесников, А.М.Салецкий, Д.Э.Харабадзе – Москва 2012.
8. Прямое и обратное включение p-n-перехода [Электронный ресурс] -https://studfiles.net/preview/6230959/page:2/ - дата обращения 27.05.2018г.
9. Входной контроль радиоэлементов [Электронный ресурс] - [https://megalektsii.ru/s145894t5.html - дата обращения 18.05.2018](https://megalektsii.ru/s145894t5.html%20-%20дата%20обращения%2018.05.2018)г.
10. Физика полупроводниковых приборов: Научная литература / А.И.Лебедев – Физматлит 2008.
11. Полупроводниковые приборы диоди, тиристори, оптоволоконные прибори: Справочное пособие / Н.Н.Горюнин – Москва ЭНЕРГОИЗДАТ, 1982.
12. Селективный вольтметр SMV-11 [Электронный ресурс] - [https://megaobuchalka.ru/7/29502.html - дата обращения 28.05.2018](https://megaobuchalka.ru/7/29502.html%20-%20дата%20обращения%2028.05.2018)г.
13. Шоковые камеры [Электронный ресурс] - <https://sovtest-ate.com/equipment/shokovye-temperaturnye-kamery/> - дата обращения 28.05.2018г.
14. Что такое элемент Пельтье, его устройство, принцип работы [Электронный ресурс] - [https://www.asutpp.ru/osnovy-elektrotexniki/chto-takoe-element-pelte-i-ego-primenenie.html - дата обращения 30.05.2018](https://www.asutpp.ru/osnovy-elektrotexniki/chto-takoe-element-pelte-i-ego-primenenie.html%20-%20дата%20обращения%2030.05.2018)г.
15. Импортозамещение малогабаритного испытательного оборудования для проведения отбраковки и испытаний ЭКБ [Электронный ресурс] - <http://n2.insu.ru/articles/1495297773.pdf> - дата обращения 30.05.2018г.