

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

Зав. кафедрой, к.т.н.

 Н. Н. Беспалов

«23» 06 2017 г.

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

**РАЗРАБОТКА МАЛОГАБАРИТНОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ ВРЕМЕНИ  
ОБРАТНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ БЫСТРО  
ВОССТАНАВЛИВАЮЩИХСЯ ДИОДОВ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ**

Автор бакалаврской работы 20.06.2018  М. К. Зубков

Обозначение бакалаврской работы БР-02069964-12.03.01-5-18

Направление 12.03.01 «Приборостроение»

Руководитель работы

канд. физ.-мат. наук, доц.

 20.06.18

В. П. Падеров

Нормоконтролер

 20.06.2018

А. А. Шестеркина

Саранск

2018

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

Институт электроники и светотехники  
Кафедра электроники и наноэлектроники

УТВЕРЖДАЮ  
Зав. кафедрой, к.т.н.

 Н. Н. Беспалов  
«12» 10 2017 г.

**ЗАДАНИЕ НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ**

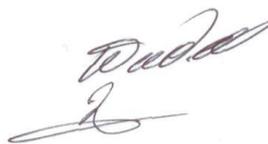
(в форме бакалаврской работы)

Студент Зубков Максим Константинович

1. Тема: «Разработка малогабаритного измерителя времени обратного восстановления быстро восстанавливающихся диодов средней мощности»  
Утверждена приказом по МордГУ №8292-с от 12.10.2017.
2. Срок представления проекта к защите 28.06.2018
3. Исходные данные для разработки.  
Разработать малогабаритный измеритель времени обратного восстановления диодов, с измерение любого диода напряжением до 1700В и тока до 50А : ток обратного восстановления 1 А, положительное напряжение питания 3,4-9,3 В, отрицательное напряжение питания 1,4-8,6 В, длительность положительного импульса 0,2мкс, длительность отрицательного импульса 2мкс, диапазон времени обратного восстановления 0,1–1мкс.
4. Содержание выпускной квалификационной работы:
  - 4.1 Введение
  - 4.2 Обзор литературы. Выбор и обоснование структурной схемы измерителя.

- 4.3.1 Разработка электрической принципиальной схемы.
- 4.3.2 Разработка конструкции.
- 4.3 Заключение
- 4.4 Список используемых источников
- 5. Перечень графического материала:
  - структурная схема;
  - временные диаграммы, поясняющие работу;
  - чертеж печатной платы;
  - сборочный чертеж платы;
  - перечень элементов;
  - электрическая принципиальная схема;
- 6. Приложения.
  - 6.1 Структурная схема.
  - 6.2 Временные диаграммы, поясняющие работу.
  - 6.3 Электрическая принципиальная схема.
  - 6.4 Чертеж печатной платы.
  - 6.5 Сборочный чертеж платы.
  - 6.6 Перечень элементов.

Руководитель проекта  
Задание принял к исполнению



В. П. Падеров  
М. К. Зубков

## РЕФЕРАТ

Выпускная работа содержит 32 листа, 7 рисунков, 5 источников, 5 приложений.

**ДИОДЫ БЫСТРОВОССТАНАВЛИВАЮЩИЕСЯ, ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ, ОБРАТНОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ, ВРЕМЯ ЖИЗНИ.**

Цель работы – разработка малогабаритного измерителя времени обратного восстановления диодов средней мощности.

В процессе работы были исследованы различные виды схем измерения времени обратного восстановления диодов.

В результате проведенной работы был разработан макет малогабаритного измерителя времени обратного восстановления диодов. Данное устройство обладает следующими конструктивными и технико-эксплуатационными характеристиками: диапазон положительного напряжения питания  $+U_n = 3,4-9,3$  В, диапазон отрицательного напряжения питания  $-U_n = 1,4-8,6$  В, диапазон тока нагрузки  $I_n = 0,3-1,1$  А, длительность положительного импульса  $T_+ = 0,2$  мкс, длительность отрицательного импульса  $T_- = 2$  мкс.

Разработанная схема может быть применена при исследовании параметров диодов.

Эффективность схемы определяется его простотой изготовления и низкой стоимостью компонентов, входящих в нее. Можно сделать вывод, что в процессе работы удалось создать бюджетный вариант устройства, которое позволяет отслеживать важный параметр быстро восстанавливающихся диодов.

					БР – 02069964 – 12.03.01 – 5 – 18			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Разработка малогабаритного измерителя времени обратного восстановления быстро восстанавливающихся диодов средней мощности	Лит.	Лист	Листов
Разраб.		Зубков М.К.	<i>[Подпись]</i>	15.06.18			4	32
Провер.		Палеров В. П.	<i>[Подпись]</i>					
Н. Контр.		Шестеркина А.А.	<i>[Подпись]</i>	22.06.18				
Утверд.		Беспалов Н.Н.	<i>[Подпись]</i>	23.06.18				
						МГУ ИЭС Приборостроение		

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
1 Схемы измерения времени обратного восстановления диодов	8
2 Выбор принципиальной схемы	13
2.1 Описание функционирования принципиальной схемы	15
2.2 Разработка топологии печатной платы	19
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	20
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	21
ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное) Схема электрическая принципиальная	21
ПРИЛОЖЕНИЕ Б(обязательное) Топология печатной платы	22
ПРИЛОЖЕНИЕ В(обязательное) Схема размещения элементов	23
ПРИЛОЖЕНИЕ Г (обязательное) Перечень элементов	24
ПРИЛОЖЕНИЕ Д (справочное) Параметры транзисторов	25

					БР – 02069964 – 12.03.01 – 5 – 18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		6

## ВВЕДЕНИЕ

Важнейшей областью технического применения полупроводниковых диодов является их использование в импульсных электронных схемах. В этих схемах полупроводниковый диод должен обладать свойствами идеального электронного ключа, который характеризуется малым сопротивлением в пропускном направлении, высоким сопротивлением в запирающем направлении и мгновенным переключением из одного состояния в другое. Однако, реальные диоды отличаются от идеального ключа тем, что при изменении режима в них протекают переходные процессы, ограничивающие быстродействие импульсных схем, в которых они используются.

Основным параметром, характеризующим свойства быстровосстанавливающихся диодов, является время восстановления обратного сопротивления диода или, проще говоря, время обратного восстановления  $t_{вос}$ . Целью данной работы является разработка схемы устройства для измерения времени обратного восстановления диодов, что позволит осуществлять контроль над параметрами конкретной полупроводниковой структуры при ее производстве.

					БР – 02069964 – 12.03.01 – 5 – 18	Лист
						7
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

## 1Схемы измерения времени переключения

Методика измерения параметра  $t_{вос.}$  с 1954 г., когда она была описана в литературе, и до настоящего времени, в основных отличительных чертах остается неизменной.

Блок схема измерения времени восстановления, логически вытекающая из определения этого параметра, представлена на рисунке 1.

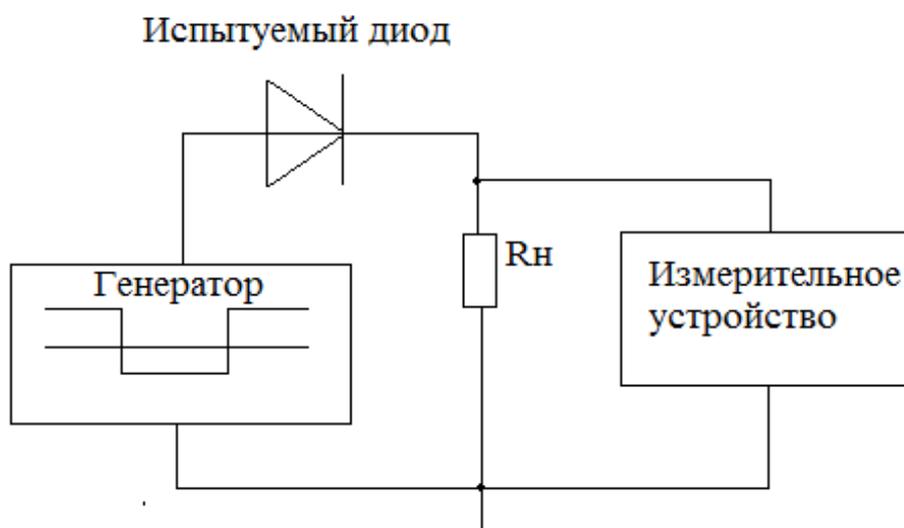


Рисунок 1 – Блок схема измерения времени восстановления

Генератор, задающий режим переключения, должен обеспечить протекание необходимого прямого тока через диод и резкое (с длительностью фронта  $t_{фр.} \ll t_{вос.}$ ) переключение его на обратное напряжение  $U_{обр.}$ . В подавляющем большинстве практически используемых схем через диод протекает постоянный прямой ток, на который накладываются запирающие импульсы длительностью 1-10 мкс. Наряду с этим используются генераторы, в которых прямой и обратный токи задаются импульсами, а так же такие, в которых испытуемый диод запертым постоянным обратным напряжением, а прямой ток задается относительно коротким отпирающим импульсом. Последний вид

переключения используется главным образом тогда, когда диод измеряется в режиме переключения столь больших по амплитуде токов, длительное протекание которых через диод не допустимо. Наибольшие трудности при измерении параметра  $t_{вос}$  возникают из-за необходимости отсчета временного интервала на уровне очень малого обратного тока  $j_{вос}$ .

Для повышения чувствительности и обеспечения возможности наблюдения и измерения на экране осциллографа малого обратного тока сигнал необходимо усиливать, но при этом усиленный сигнал от тока  $j_{пр.} + j_{в.}$  перегружает усилитель вертикального отклонения осциллографа, нарушая его линейность.

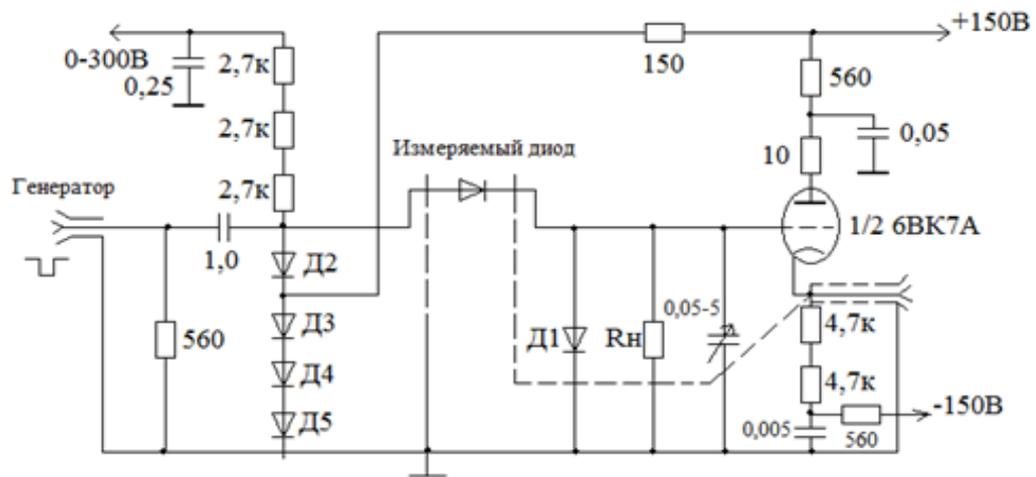
Для устранения этих затруднений различными путями ограничивают на некоторых уровнях прямой и обратные токи и вырезанную таким образом часть осциллограммы, лежащую вблизи нулевой линии токов, усиливают и просматривают на осциллограмме.

На рисунке 2 показаны три наиболее распространенные схемы измерения времени восстановления диодов среднего быстродействия: JAN-256 (рисунок 2а), Modified IBM-Y-test (EIASP-590) (рисунок 2б) и схема Национального бюро стандартов США (рисунок 2в).

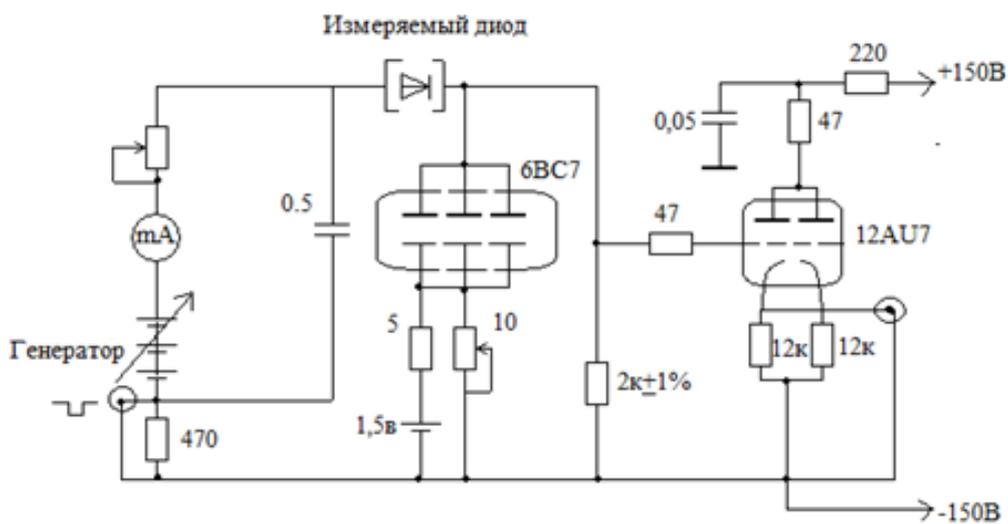
Наименование этих схем дается здесь в связи с тем, что в зарубежной практике принято наряду с приведением значения времени восстановления на тот или иной диод указывать и схему его измерения.

Для двух первых схем характерно применение вакуумного или полупроводникового диода, шунтирующего сопротивлением нагрузки при протекании прямого тока. Поскольку прямое сопротивление вакуумного диода порядка  $10^2$  Ом, величина  $R_n$  обычно выбирается достаточно большой (1-2 кОм). Таким образом, сопротивление нагрузки оказывается в несколько десятков раз меньше при протекании прямого тока, чем при протекании обратного, иными словами, для этих схем характерно резкое различие токовых масштабов при протекании через диод токов резкого направления.

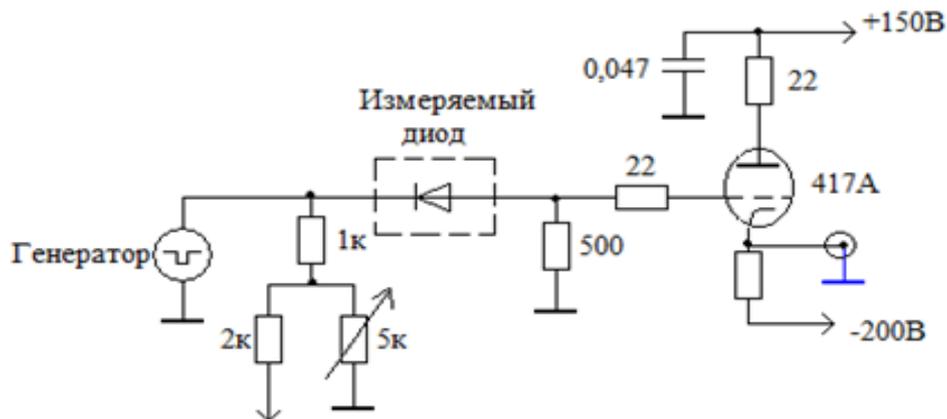
					БР – 02069964 – 12.03.01 – 5 – 18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		9



а



б



в

Рисунок 2 – Принципиальные схемы измерения времени восстановления обратного сопротивления: а – схема JAN-256, б – схема Modified IBM-Y-test (EIASP-590), в – схема Национального бюро стандартов США

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Емкость, шунтирующая сопротивление нагрузки, включая и емкость монтажа, обычно устанавливается равной 10пФ и при необходимости специально подстраивается до этой величины. Использование на выходе схем катодных повторителей делает установки нечувствительными к длине кабеля, соединяющего их с осциллографом. Цепочка диодов Д2-Д5 (рисунок 2,а) выполняет, по сути дела, роль низковольтного стабилитрона – поддерживает напряжение на входе схемы, равное единицам вольт, независимо от величины прямого тока. Таким образом, исключается необходимость в большой амплитуде запирающего импульса. Используемая в катодной цепи (рисунок 2,б) батарея 1,5В с помощью низкоомного делителя позволяет сбалансировать остаточный ток вакуумного диода.

Попытка избавиться от шунтирующего диода сделана в схеме, которая приведена на рисунке 2в. В этой схеме шунтирующий диод постоянно смещен в обратном направлении, а прямой импульс, открывающий его, переводит вакуумный триод в режим отсечки, чем и достигается ограничение прямого импульса на экране осциллографа. Эта схема, вероятно, наиболее точная из всех представленных на рисунке 2, однако быстродействие ее также относительно невелико, что связано с необходимостью попеременного переключения лампы в режим отсечки.

В 2004 г. Тогатовым В.В. и Гнатюком П.А. была предложена новая схема для снятия переходных характеристик и измерения параметров ультрабыстрых диодных структур в различных исполнениях. Особенностью прибора является возможность измерений в наносекундном диапазоне. Управление процессом измерения, а также обработка, отображение и хранение информации осуществляется с помощью персонального компьютера.

На рисунке 3 приведена эта современная электрическая схема. Схема состоит из формирователей импульсов прямого и обратного токов, подключенных непосредственно к испытуемому диоду *D.U.T.* Первый построен на транзисторе  $Q_2$  по схеме источника стабильного тока с регулирующим усилителем  $U_3$  в цепи обратной связи. Сам источник тока по отношению к

					БР – 02069964 – 12.03.01 – 5 – 18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		11

нагрузке (диоду *D.U.T.*) включен по схеме модулятора с частичным разрядом накопительной емкости  $C_4$ . Последняя заряжается в паузе между импульсами от регулируемого источника до напряжения  $V_{PWR}$ . Индуктивность  $L_2$ , включенная последовательно в цепь источника прямого тока, осуществляет импульсную развязку цепей формирователей. При этом величина  $L_2$  совместно с величиной  $V_{PWR}$  определяют скорость нарастания прямого тока  $di_f^+/dt$  при измерении  $V_{FM}$ .

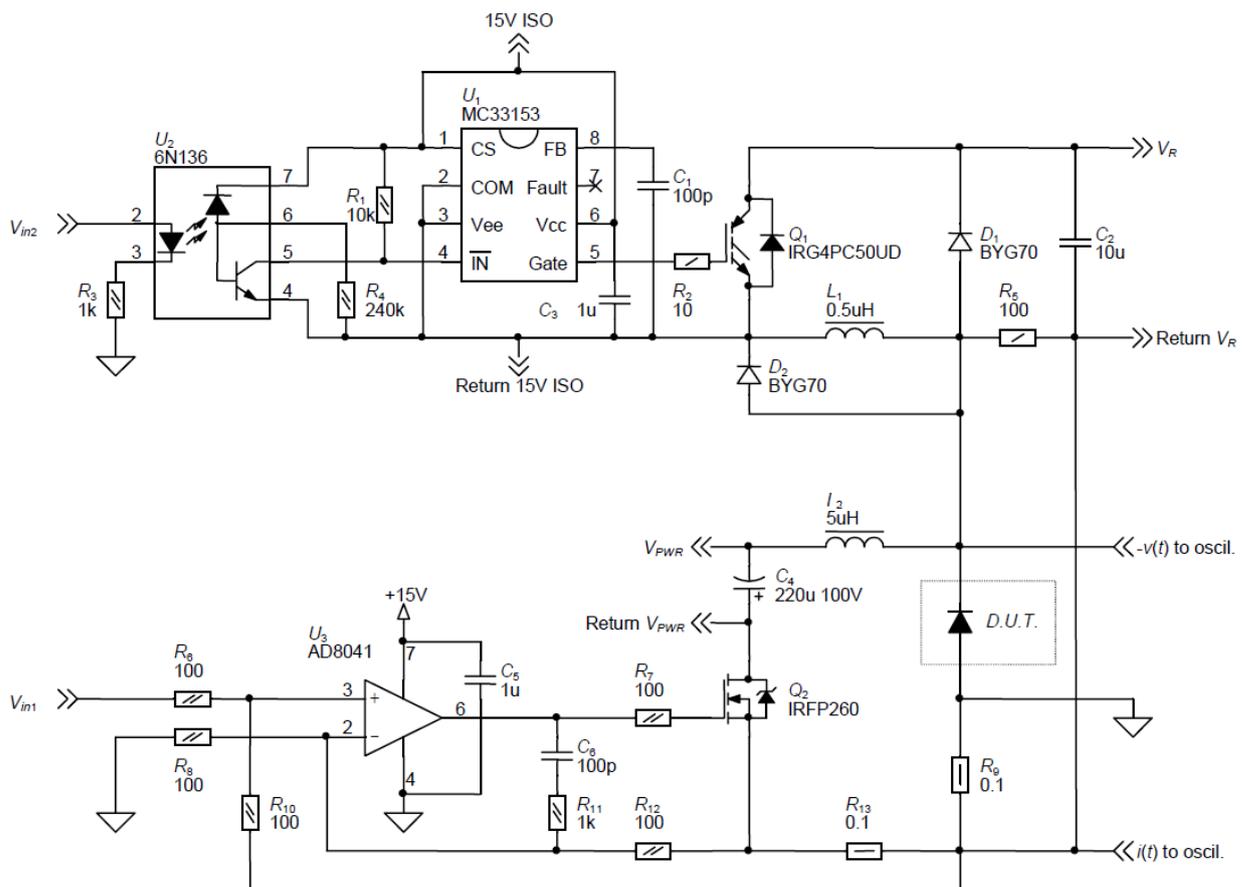


Рисунок 3 – Схема регистрации переходных характеристик

Формирователь импульсов обратного тока построен на транзисторе  $Q_1$ , который подключает обратное напряжение  $V_{RK}$  индуктивности  $L_1$ . Транзистор  $Q_1$  управляется драйвером  $U_1$ , осуществляющим усиление входного сигнала по мощности, а потенциальная развязка цепи входного сигнала с цепью затвор-исток  $Q_1$  обеспечивается оптопарой  $U_2$ . Конденсатор  $C_2$  заряжается от

регулируемого источника напряжения  $V_R$ , величина которого совместно с величиной  $L_1$  определяют значение  $di_f^-/dt$  при измерении  $t_{rr}$ . Демпфирующий диод  $D_1$  создает дополнительный контур тока после восстановления испытуемого диода  $D.U.T$ . Импульсы прямого и обратного токов через диод снимаются с шунта  $R_9$ , а импульсы напряжения на диоде – с катода  $D.U.T$ .

## 2 Выбор принципиальной схемы

В качестве разрабатываемого прибора было выбрано устройство, которое описано в статье М. П. Клебанова. Его отличительной особенностью является диапазон значений токов переключения (прямого и обратного) – около 1 А и возможность наблюдения процесса восстановления обратного сопротивления диодной структуры за время 100 нс и более. Кроме того, прибор прост, содержит минимально необходимое количество компонентов, имеет небольшие габариты.

Схема устройства приведена на рисунке 4. Задающий генератор (мультивибратор) собран на импортной микросхеме сдвоенного одновибратора CD4098BE.

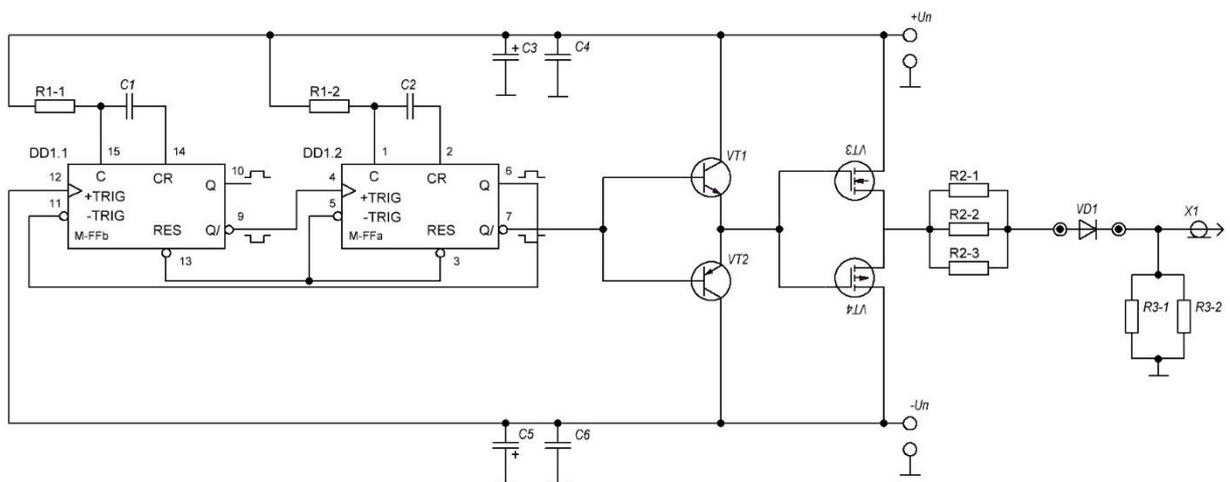


Рисунок 4 – Принципиальная схема устройства для измерения времени обратного восстановления диодов

На выходе формируется положительный импульс (уровень  $U_{П1}$ ) длительностью около 0,2 мкс и отрицательный (уровень  $U_{П2}$ ) – 0,8 мкс. Выбранные длительности обеспечивают установление стационарного значения прямого тока и спад обратного тока для опытных образцов быстровосстанавливающихся диодов со временем восстановления меньше 0,1 мкс.

Импульсы генератора подаются на эмиттерный повторитель на комплементарной паре  $VT1$  и  $VT2$ . К выходу повторителя подключены затворы комплементарной пары мощных МДП-транзисторов с индуцированным каналом  $VT3$  и  $VT4$ . Транзисторы  $VT3$  и  $VT4$  формируют импульсы прямого и обратного токов через исследуемый диод  $VD$ . Прямой ток определяется напряжением источника питания  $U_{П1}$ , сопротивлением  $R2$ , сопротивлением токоизмерительного резистора  $R3$  и сопротивлением канала открытого  $p$ -канального транзистора  $VT3$ . Импульс обратного тока задается напряжением источника питания  $U_{П2}$ , сопротивлениями  $R2$  и  $R3$ , и сопротивлением канала  $n$ -канального транзистора  $VT4$  в открытом состоянии. Таким образом, измерение времени переключения проводится при почти одинаковых значениях прямого и обратного токов. Этот режим является оптимальным при оценке качества большинства структур.

Конструкция прибора обеспечивает минимальную длину и индуктивность соединений в цепи от источников питания до входа осциллографа. Схема размещена в компактной коробке, которая непосредственно подсоединяется к осциллографу. Для уменьшения собственной индуктивности резисторы  $R2$  и  $R3$  собраны из нескольких соединенных параллельно резисторов типа МЛТ-1.

Питание устройства осуществляется от стабилизированного источника, обеспечивающего средний ток 1 А и импульсный – 2-3 А.

Нестабильность тока во времени и при смене исследуемых структур не превышает 5%. Рекомендуется применять осциллографы с временем развертки не менее 20 нс на деление.

					БР – 02069964 – 12.03.01 – 5 – 18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		14

## 2.1 Описание функционирования принципиальной схемы

Микросхема мультивибратора вырабатывает на выходе 7 прямоугольные импульсы, длительность которых задается  $RC$ -цепочками.

Зависимости сопротивления и емкости от времени импульса показаны на рисунке 5 и рисунке 6.

Так как микросхема генератора обладает небольшой нагрузочной способностью, данные транзисторы предназначены для максимально быстрого заряда (транзистор  $VT1$ ) и разряда (транзистор  $VT2$ ) входных емкостей (совокупность емкостей переходов затвор-исток и затвор-сток) МОП-транзисторов. Стоит отметить, что транзисторные ключи  $VT3$  и  $VT4$  также выступают в качестве усилителей тока.

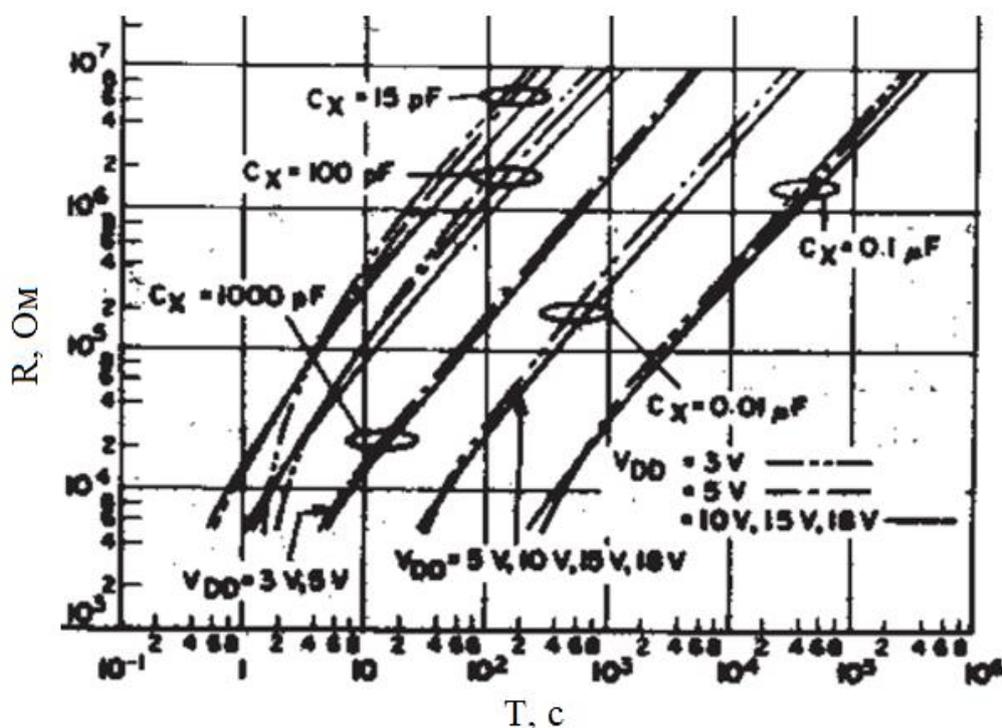


Рисунок 5 – Зависимость сопротивления от длительности импульса

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

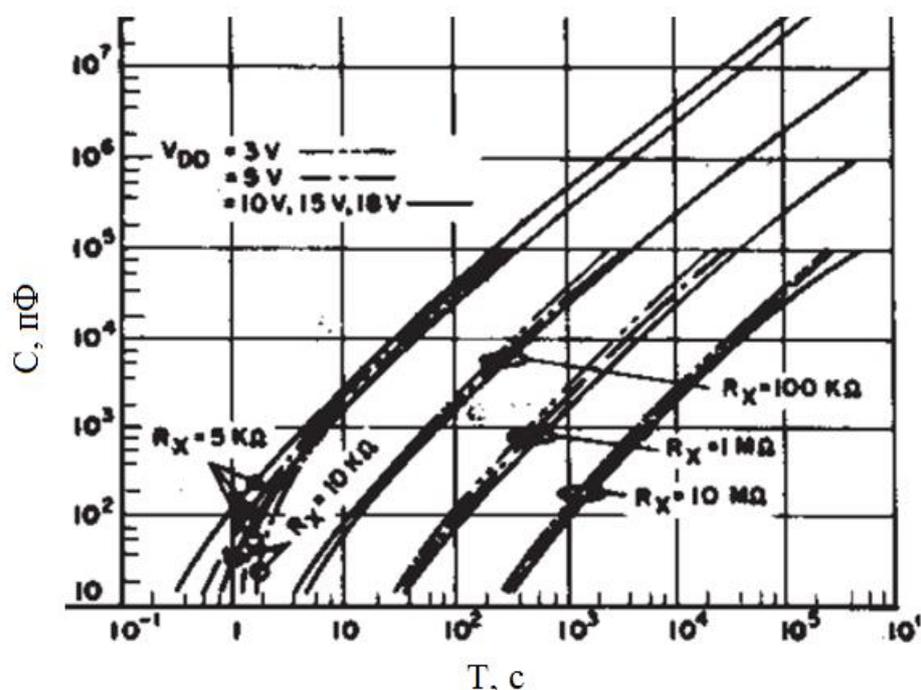


Рисунок 6 – Зависимость ёмкости от длительности импульса

Для формирования импульсов положительной полярности длительностью 1 мкс, были выбраны следующие номиналы элементов:  $R1-1 = 5\text{ кОм}$ ,  $C1-1 = 22\text{ пФ}$ . Для формирования импульсов отрицательной полярности длительностью 2 мкс, были выбраны следующие номиналы элементов:  $R1-2 = 5\text{ кОм}$ ,  $C1-2 = 100\text{ пФ}$ . Далее сигналы подаются на эмиттерный повторитель на комплементарной паре  $VT1$  и  $VT2$ , который выступает в качестве усилителя тока. Так как микросхема генератора обладает небольшой нагрузочной способностью, данные транзисторы предназначены для максимально быстрого заряда (транзистор  $VT1$ ) и разряда (транзистор  $VT2$ ) входных емкостей (совокупность емкостей переходов затвор-исток и затвор-сток) МОП-транзисторов. Стоит отметить, что транзисторные ключи  $VT3$  и  $VT4$  также выступают в качестве усилителей тока.

При подаче напряжения отрицательной полярности транзистор  $VT4$  находится в закрытом состоянии, а транзистор  $VT3$  – в открытом. Поэтому ток будет протекать от положительной шины питания, через токоограничивающие резисторы, через диод, резистор  $R3$  на общую шину. В результате

чего падение напряжения на диоде составит приблизительно 1 В. При смене полярности прикладываемого напряжения транзистор  $VT3$  перейдет в закрытое состояние, а  $VT4$  будет находиться в открытом состоянии. Ток через диод потечёт в обратном направлении: с общей шины, через резистор  $R3$ , через диод, через токоограничивающие резисторы  $R2$  и на отрицательную шину питания.

Цепочка параллельно соединенных резисторов  $R2-1$ ,  $R2-2$ ,  $R2-3$  предназначена для ограничения тока через диод, а падение напряжения на резисторах  $R3-1$ ,  $R3-2$ , также включенных параллельно, позволяет наблюдать осциллограмму и измерять длительность переходных процессов по току.

Рассчитаем цепочку параллельно соединенных резисторов  $R2-1$ ,  $R2-2$ ,  $R2-3$ . Резисторы имеют одинаковое сопротивление, следовательно:

$$\frac{1}{R_2} = \frac{1}{R_{2-1}} + \frac{1}{R_{2-2}} + \frac{1}{R_{2-3}} = \frac{3}{R_{2-1}}; \quad (1)$$

$$R_2 = \frac{R_{2-1}}{3}; \quad (2)$$

$$U_{R2} = U_{II} - U_{VD} - U_{R_{dson}} - U_{III} = 7,5 - 1 - 1 - 0,5 = 5B; \quad (3)$$

$$R_2 = \frac{U_{R2}}{I_H} = \frac{5}{1} = 5Om; \quad (4)$$

$$R_{2-1} = 3 \cdot R_2 = 3 \cdot 5 = 15Om; \quad (5)$$

$$R_{2-1} = R_{2-2} = R_{2-3} = 15Om, \quad (6)$$

где  $U_{ш}$  – падение напряжения на шунтировочном резисторе,  $U_{R_{dson}}$  – падение напряжения на канале полевого транзистора. Падение напряжения на резисторе выбрано таким, чтобы на нем выделялась малая мощность потерь.

Также, необходимо рассчитать мощность потерь на резисторах  $R_{2-1}$ ,  $R_{2-2}$ ,  $R_{2-3}$ . Она составит:

$$P_{R_{2-1}} = \left(\frac{I_H}{3}\right)^2 \cdot R_{2-1} \cdot \frac{t + t_{rr}}{T} = \left(\frac{1}{3}\right)^2 \cdot \frac{0,2 + 0,6}{1} \cdot 15 = 1,33 \text{ Вт}; \quad (7)$$

$$P_{R_{2-1}} = P_{R_{2-2}} = P_{R_{2-3}} = 1,33 \text{ Вт}. \quad (8)$$

$t$  – длительность импульса,  $t_{rr}$  – время обратного восстановления,  $T$  – период импульса.

Рассчитаем сопротивления шунтировочных резисторов:

$$\frac{1}{R_3} = \frac{1}{R_{3-1}} + \frac{1}{R_{3-2}} = \frac{2}{R_{3-1}}; \quad (9)$$

$$R_3 = \frac{R_{3-1}}{2}; \quad (10)$$

$$R_2 = \frac{U_{ш}}{I_H} = \frac{0,5}{1} = 0,5 \text{ Ом}; \quad (11)$$

$$R_{3-1} = 2 \cdot R_3 = 2 \cdot 0,5 = 1 \text{ Ом}; \quad (12)$$

$$R_{3-1} = R_{3-2} = 1 \text{ Ом}. \quad (13)$$

Также, необходимо рассчитать мощность потерь на резисторах  $R_{3-1}$ ,  $R_{3-2}$ . Она составит:

$$P_{R3-1} = \left(\frac{I_H}{2}\right)^2 \cdot \frac{t+t_{rr}}{T} \cdot R_{3-1} = \left(\frac{1}{2}\right)^2 \cdot \frac{0,2+0,6}{1} \cdot 1 = 0,2 \text{ Вт}; \quad (14)$$

$$P_{R3-1} = P_{R3-2} = 0,2 \text{ Вт}. \quad (15)$$

## 2.2 Разработка топологии печатной платы

На основе принципиальной схемы (см. рисунок 4) при помощи программного обеспечения Sprint-Layout 6.0 была создана однослойная топология печатной платы. Она обладает следующими геометрическими размерами: длина –  $l = 67$  мм, ширина –  $b = 57$  мм. Исходя из этих данных, можно определить площадь шаблона:

$$S = l \cdot b = 67 \cdot 57 = 3819 \text{ мм}^2. \quad (16)$$

Помимо общей длины и ширины шаблона на топологии также указаны размеры токопроводящих дорожек. Их ширина прямо пропорционально зависит от величины протекающего тока.

На рисунке 7 изображена полученная топология с помощью программного обеспечения Sprint-Layout 6.0

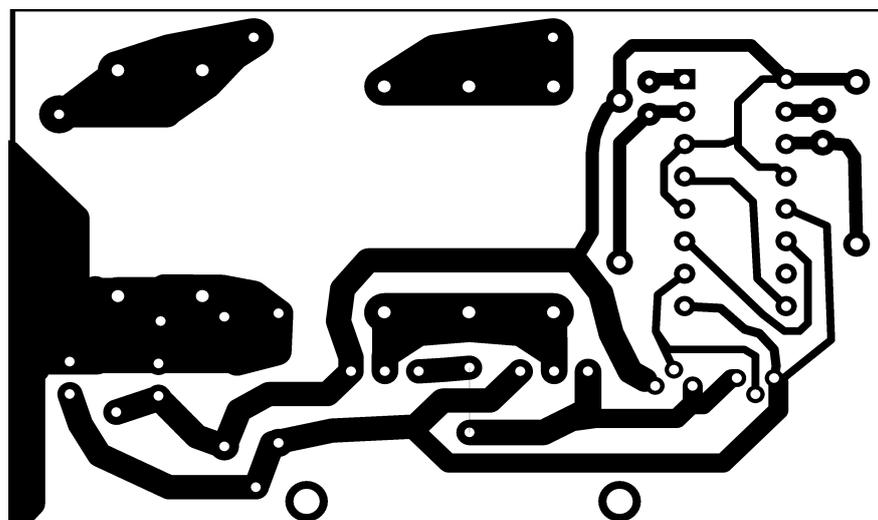


Рисунок 7 – Топология печатной платы

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выполнения выпускной квалификационной работы, в соответствии с заданием, проделана следующая работа и получены следующие результаты:

Посредством программного обеспечения sPlan 6.0 нарисована принципиальная схема устройства для измерения времени обратного восстановления диодов.

На основе принципиальной схемы разработана топология печатной платы в программном обеспечении Sprint-Layout 6.0. Она обладает следующими геометрическими размерами: длина –  $l = 67$  мм, ширина –  $b = 57$  мм, площадь –  $S = 3819$  мм<sup>2</sup>.

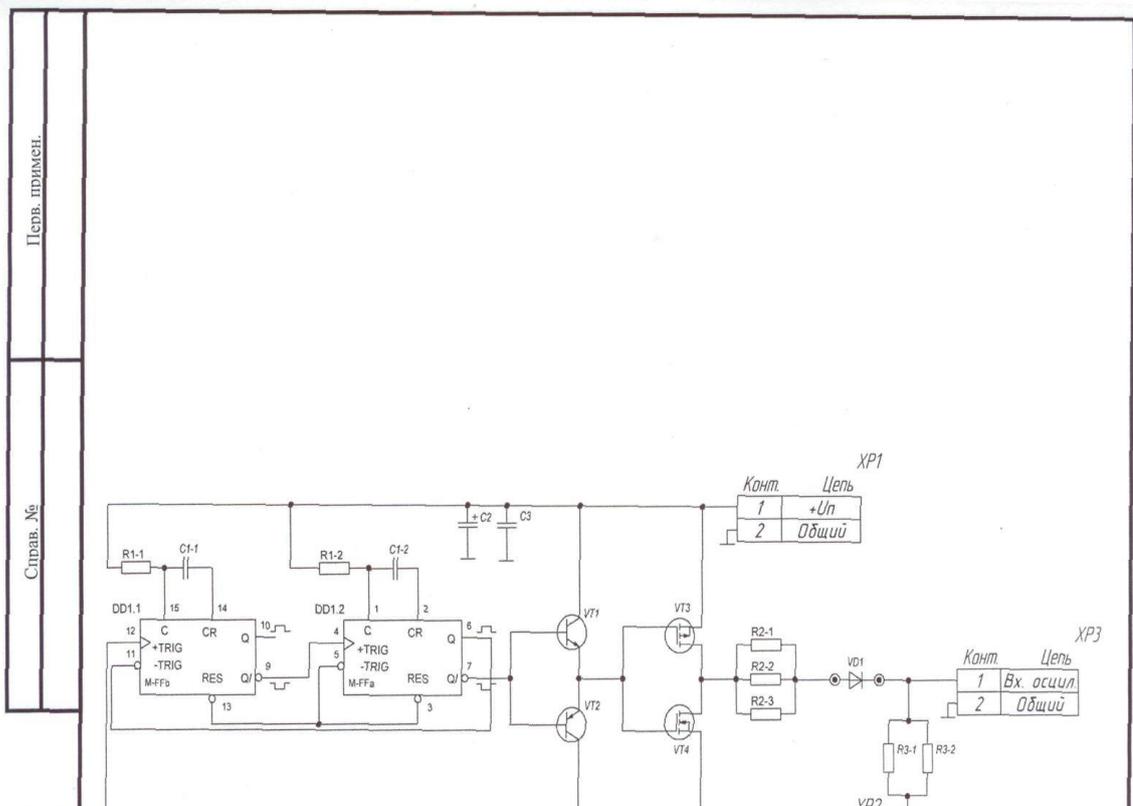
Электрические параметры устройства: напряжение питания  $+U_{п} = 3,4 - 9,3$  В,  $-U_{п} = 1,4 - 8,6$  В, длительность положительного импульса около 0,2 мкс, длительность отрицательного импульса примерно 2 мкс, времена переключения 0,1 – 1 мкс.

Вывод: с помощью данного прибора можно измерять время обратного восстановления в диапазоне токов  $I_{н} = 0,25 - 1$  А и в диапазоне времен обратного восстановления от 100 до 1000 нс.

					БР – 02069964 – 12.03.01 – 5 – 18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		20

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Клебанов М. П. Устройство для измерения времени переключения биполярных полупроводниковых приборов / М. П. Клебанов // Электронная промышленность. – 1996. – № 2. – С. 28.
2. Пасынков В. В. Полупроводниковые приборы: учебник для вузов / В. В. Пасынков, Л. К. Чиркин. – М. :Высш. шк., 1987. – 479 с.
3. Тогатов В. В. Прибор для регистрации переходных характеристик диодных структур / В. В. Тогатов, П. А. Гнатюк // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2004. – №15. – С. 358-364.
4. Гаман В. И. Физика полупроводниковых приборов : учеб.пособие для вузов / В. И. Гаман. – Томск: Изд-во НТЛ, 2000. – 426 с.
5. Носов Ю.Р. Полупроводниковые импульсные диоды : учеб.пособие для вузов / Ю. Р. Носов. – М.: Московская типография №10, 1965. –224с.
6. CD4098 Types [Электронныйресурс]. // TexasInstruments. – 2004. – Режим доступа: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cd4098b.pdf>



Справ. №	Перв. примен.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Взам. инв. №
----------	---------------	----------------	---------------	--------------

БР – 02069964 – 12.03.01 – 05 – 18

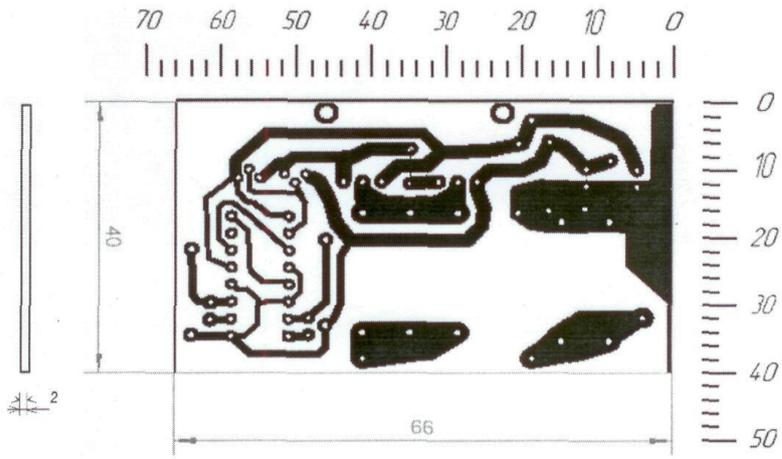
					Лит.			Масса	Масштаб
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					2:1
Разраб.		Зубков М.К.	<i>[Signature]</i>	15.07.94					
Провер.		Падеров В. П.	<i>[Signature]</i>	19.06.94					
Т. Контр.									
Реценз.									
Н. Контр.		Шестеркина А. А.	<i>[Signature]</i>	20.06.94					
Утверд.		Беспалов Н. Н.	<i>[Signature]</i>	29.06.94					
<p>Схема устройства для измерения времени обратного восстановления диодов</p> <p>электрическая принципиальная</p>					Лист	1	Листов	1	
					МГУ им. Н. П. Огарёва				



Перв. примен.  
Справ. №

Условное обозначение отверстий	Диаметры отверстий, мм	Размер элемента проводящего рисунка мм	Количество отверстий
○	0,8	2x2	62
○	3,0	-	2

1. Плата должна соответствовать ГОСТ 23752-79
2. Минимальное расстояние между дорожками 0,5 мм.
3. Координатная сетка 2 мм.



Подпись и дата  
Изм. № дубл.  
Взам. инв. №  
Подпись и дата  
Изм. № подл.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
Разраб.		Зубков М.К.	<i>[Signature]</i>	02.06.18
Провер.		Падеров В. П.	<i>[Signature]</i>	02.06.18
Т. Контр.				
Реценз.				
Н. Контр.		Шестеркина А. А.	<i>[Signature]</i>	02.06.18
Утверд.		Беспалов Н. Н.	<i>[Signature]</i>	02.06.18

БР – 02069964 – 12.03.01 – 05 – 18

Устройство для измерения времени обратного восстановления диодов

Лит.	Масса	Масштаб
		2:1
Лист 1	Листов 1	

Чертеж печатной платы

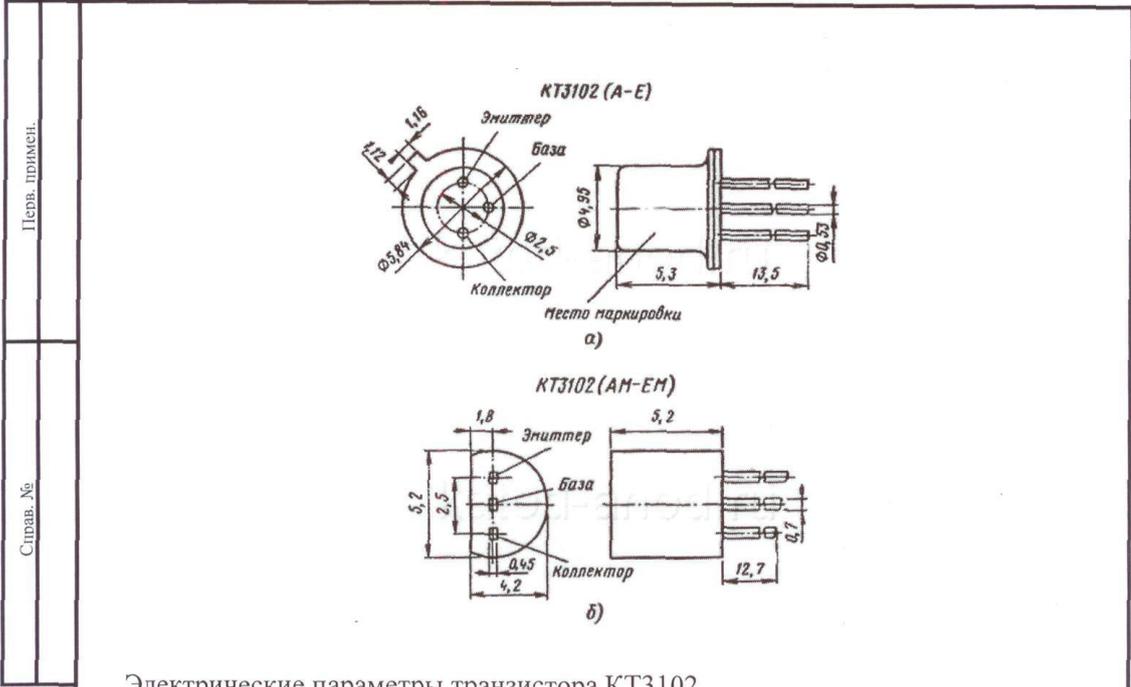
МГУ им. Н. П. Огарёва

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
Разраб.		Зубков М.К.	<i>[Signature]</i>	15.01.16
Провер.		Падеров В. П.	<i>[Signature]</i>	16.01.16
Т. Контр.				
Реценз.				
Н. Контр.		Шестеркина А. А.	<i>[Signature]</i>	16.01.16
Утверд.		Беспалов Н. Н.	<i>[Signature]</i>	20.01.16

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
Разраб.		Зубков М.К.	<i>[Signature]</i>	15.01.16
Провер.		Падеров В. П.	<i>[Signature]</i>	16.01.16
Т. Контр.				
Реценз.				
Н. Контр.		Шестеркина А. А.	<i>[Signature]</i>	16.01.16
Утверд.		Беспалов Н. Н.	<i>[Signature]</i>	20.01.16

Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	БР - 02069964 - 12.03.01 - 05 - 18
Сздав. №			Устройство для измерения времени обратного восстановления диодов
Перв. примен.			Лит. / Масса / Масштаб
			Лист 1 / Листов 1
			МГУ им. Н. П. Огарёва





Электрические параметры транзистора КТ3102

- Коэффициент передачи тока (статический). Схема с общим эмиттером.

$U_{кб} = 5 \text{ В}, I_3 = 2 \text{ мА}:$

$T = +25^\circ\text{C}: 200 \div 500$

$T = -40^\circ\text{C}: 50 \div 500$

$T = +85^\circ\text{C}, \text{ не менее: } 200$

- Граничная частота коэффициента передачи тока

$U_{кб} = 5 \text{ В}, I_3 = 10 \text{ мА}, \text{ не менее: } 300 \text{ МГц}$

- Постоянная времени цепи обратной связи на высокой частоте.

$I_3 = 10 \text{ мА}, U_{кб} = 5 \text{ В}, \text{ не более: } 10 \text{ пс}$

- Коэффициент шума при  $I_3 = 0.2 \text{ мА}, U_{кб} = 5 \text{ В}, f = 1 \text{ кГц}, \text{ не более: } 10 \text{ дБ}$

Перв. примен.							
Справ. №							
Подпись и дата							
Инов. № дубл.							
Взам. инв. №							
Подпись и дата							
Инов. № полн.							
				БР – 02069964 – 12.03.01 – 05 – 18			
				Параметры транзистора КТ3102	Лит.	Масса	Масштаб
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись		Дата		
Разраб.		Зубков М. К.	<i>[Signature]</i>				
Провер.		Падеров В. П.	<i>[Signature]</i>				
Т. Контр.					Лист	1	Листов
Реценз.							2
Н. Контр.		Шестеркина А. А.	<i>[Signature]</i>	29.06.18	МГУ им. Н. П. Огарёва		
Утверд.		Беспалов Н. Н.	<i>[Signature]</i>	29.06.18			

Перв. примен.

• Граничное напряжение при  $I_3 = 10 \text{ мА}$ ,  $I_6 = 0$ , не менее: 20 В

• Ток К-Э (обратный) при  $U_{кэ} = 30 \text{ В}$ , не более: 0.05 мкА

• Ток коллектора (обратный), не более:

при  $U_{кб} = 30 \text{ В}$

$T = +25^\circ\text{C}$  0.015 ÷ 0.05 мкА

$T = -40^\circ\text{C}$  0.015 мкА

$T = +85^\circ\text{C}$  5 мкА

• Ток эмиттера (обратный).  $U_{эб} = 5 \text{ В}$ , не более: 10 мкА

• Ёмкость коллекторного перехода.  $U_{кб} = 5 \text{ В}$ , не более: 6 пФ

### Предельные эксплуатационные характеристики транзисторов КТ3102

• Напряжение К-Б (постоянное): 30 В

• Напряжение К-Э (постоянное): 30 В

• Постоянное напряжение Э-Б 5 В

• Ток коллектора (постоянный): 100 мА

• Ток коллектора (импульсный) при  $t_n \leq 40 \text{ мкс}$ ,  $Q \geq 500200 \text{ мА}$

• Рассеиваемая мощность коллектора (постоянная) при  $T = -40 \dots +25^\circ\text{C}$   
250 мВт

• Рабочая температура (окружающей среды)  $-40 \dots +85^\circ\text{C}$

Подпись и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инв. № подл.

БР – 02069964 – 12.03.01 – 05 – 18

Параметры транзистора					Лит.	Масса	Масштаб
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			
Разраб.		Зубков М.К.					
Провер.		Падеров В. П.					
Т. Контр.							
Реценз.							
Н. Контр.		Шестеркина А. А.					
Утверд.		Беспалов Н. Н.					

КТ3102

Лит.

Масса

Масштаб

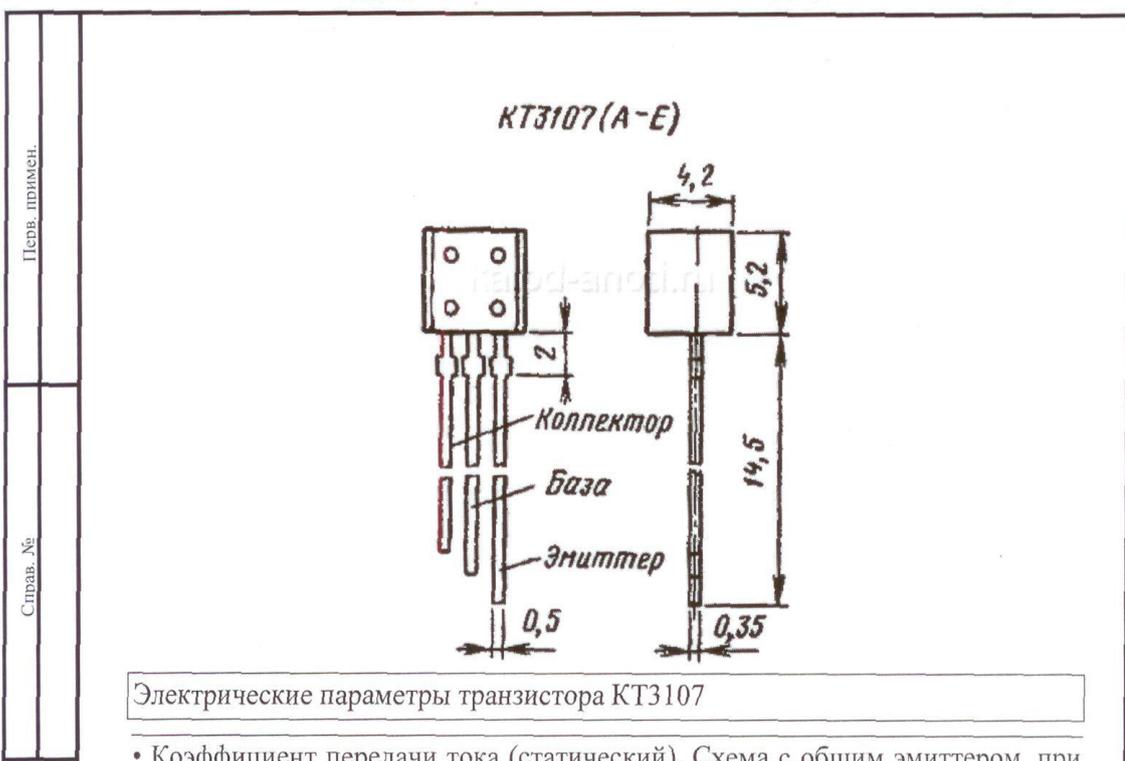
Лист

2

Листов

2

МГУ им. Н. П. Огарёва



Электрические параметры транзистора КТ3107

• Коэффициент передачи тока (статический). Схема с общим эмиттером. при  $U_{кб} = 5 В$ :

$I_3 = 2 мА: 70 \div 140$

$I_3 = 0.01 мА: 20 \div 50$

$I_3 = 100 мА: 30 \div 60$

• Граничная частота коэффициента передачи тока при  $U_{кб} = 5 В, I_3 = 10 мА$ , не менее: 200 МГц

• Коэффициент шума при  $I_3 = 0.2 мА, U_{кб} = 5 В, f = 1 кГц$ , не более: 10 дБ

• Напряжение насыщения К-Э, не более:

при  $I_k = 100 мА, I_б = 5 мА: 0.5 В$

при  $I_k = 10 мА, I_б = 0.5 мА: 0.2 В$

Перв. примен.
Справ. №
Подпись и дата
Инв. № дубл.
Взам. инв. №
Подпись и дата
Инв. № подл.

БР – 02069964 – 12.03.01 – 05 – 18						
Параметры транзистора КТ3107				Лит.	Масса	Масштаб
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		
Разраб.		Зубков М.К.	<i>[Signature]</i>			
Провер.		Палеров В. П.	<i>[Signature]</i>			
Т. Контр.					Лист 1	Листов 2
Реценз.					МГУ им. Н. П. Огарёва	
Н. Контр.		Шестеркина А. А.	<i>[Signature]</i>	20.06.13		
Утверд.		Беспалов Н. Н.	<i>[Signature]</i>	20.06		

Перв. примен.

Справ. №

Подпись и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инв. № подл.

• Напряжение насыщения Б-Э, не более:

при  $I_k = 100 \text{ mA}$ ,  $I_b = 5 \text{ mA}$  1 В

при  $I_k = 10 \text{ mA}$ ,  $I_b = 0.5 \text{ mA}$  0.8 В

• Ток коллектора (обратный), при  $U_{кб} = 20 \text{ В}$  не более:

$T = +25^\circ\text{C}$  0.1 мкА

$T = +125^\circ\text{C}$  4 мкА

• Напряжение К-Б (постоянное): 50 В

КТ3107А

• Напряжение К-Э (постоянное): 45 В

КТ3107А

• Напряжение Э-Б (постоянное) 5 В

• Ток коллектора (постоянный): 100 мА

• Ток коллектора (импульсный) при  $t_n \leq 10 \text{ мкс}$ ,  $Q \geq 2 \text{ 200 мА}$

• Рассеиваемая мощность коллектора (постоянная):

$T \leq +25^\circ\text{C}$  300 мВт

$T = +125^\circ\text{C}$  60 мВт

• Тепловое сопротивление переход – среда  $0.42^\circ\text{C/мВт}$

• Температура р-n перехода  $+150^\circ\text{C}$

• Рабочая температура (окружающей среды)  $-60 \dots +125^\circ\text{C}$

БР – 02069964 – 12.03.01 – 05 – 18

Параметры транзистора

КТ3107

Лит.

Масса

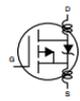
Масштаб

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
Разраб.		Зубков М.К.		
Провер.		Падеров В. П.		
Т. Контр.				
Реценз.				
Н. Контр.		Шестеркина А. А.		
Утверд.		Беспалов Н. Н.		

Лист	1	Листов	2	

МГУ им. Н. П. Огарёва



Перв. примен.	<b>Dynamic</b>										
	Input Capacitance	$C_{iss}$	$V_{GS} = 0\text{ V},$ $V_{DS} = -25\text{ V},$ $f = 1.0\text{ MHz},$ see fig. 5		-	1400	-	pF			
	Output Capacitance	$C_{oss}$			-	590	-				
	Reverse Transfer Capacitance	$C_{rss}$			-	140	-				
	Total Gate Charge	$Q_g$	$V_{GS} = -10\text{ V}$	$I_D = -19\text{ A}, V_{DS} = -80\text{ V},$ see fig. 6 and 13 <sup>b</sup>	-	-	61	nC			
	Gate-Source Charge	$Q_{gs}$			-	-	14				
	Gate-Drain Charge	$Q_{gd}$			-	-	29				
	Turn-On Delay Time	$t_{d(on)}$	$V_{DD} = -50\text{ V}, I_D = -19\text{ A},$ $R_g = 9.1\ \Omega, R_D = 2.4\ \Omega,$ see fig. 10 <sup>b</sup>			-	16	-	ns		
	Rise Time	$t_r$				-	73	-			
	Turn-Off Delay Time	$t_{d(off)}$				-	34	-			
	Fall Time	$t_f$				-	57	-			
	Internal Drain Inductance	$L_D$	Between lead, 6 mm (0.25") from package and center of die contact				-	4.5	-	nH	
	Internal Source Inductance	$L_S$					-	7.5	-		
	<b>Drain-Source Body Diode Characteristics</b>										
Continuous Source-Drain Diode Current	$I_S$	MOSFET symbol showing the integral reverse p - n junction diode				-	-	-19	A		
Pulsed Diode Forward Current <sup>a</sup>	$I_{SM}$					-	-	-72			
Body Diode Voltage	$V_{SD}$	$T_J = 25\text{ }^\circ\text{C}, I_S = -19\text{ A}, V_{GS} = 0\text{ V}^b$			-	-	-5.0	V			
Body Diode Reverse Recovery Time	$t_{rr}$	$T_J = 25\text{ }^\circ\text{C}, I_F = -19\text{ A}, di/dt = 100\text{ A}/\mu\text{s}^b$			-	130	260	ns			
Body Diode Reverse Recovery Charge	$Q_{rr}$				-	0.35	0.70	$\mu\text{C}$			
Forward Turn-On Time	$t_{on}$	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by $L_S$ and $L_D$ )									

Справ. №													
Подпись и дата													
Инов. № дубл.													
Взам. инв. №													
Подпись и дата													
Инов. № подл.													
					БР – 02069964 – 12.03.01 – 05 – 18								
					Параметры транзистора			Лит.	Масса	Масштаб			
					IRF9540								
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						Лист	2	Листов	2
Разраб.	Зубков М.К.												
Провер.	Падеров В. П.												
Т. Контр.													
Реценз.													
Н. Контр.	Шестеркина А. А.									МГУ им. Н. П. Огарёва			
Утверд.	Беспалов Н. Н.												

Лист № \_\_\_\_\_

Стр. № \_\_\_\_\_

Подпись и дата

Изм. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Изм. № подл.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS ( $T_C = 25\text{ }^\circ\text{C}$ , unless otherwise noted)					
PARAMETER	SYMBOL		LIMIT	UNIT	
Drain-Source Voltage	$V_{DS}$		100	V	
Gate-Source Voltage	$V_{GS}$		$\pm 20$		
Continuous Drain Current	$V_{GS}$ at 10 V	$T_C = 25\text{ }^\circ\text{C}$	28	A	
		$T_C = 100\text{ }^\circ\text{C}$	20		
Pulsed Drain Current <sup>a</sup>	$I_{DM}$		110		
Linear Derating Factor			1.0	W/ $^\circ\text{C}$	
Single Pulse Avalanche Energy <sup>b</sup>	$E_{AS}$		230	mJ	
Repetitive Avalanche Current <sup>a</sup>	$I_{AR}$		28	A	
Repetitive Avalanche Energy <sup>a</sup>	$E_{AR}$		15	mJ	
Maximum Power Dissipation	$T_C = 25\text{ }^\circ\text{C}$		$P_D$	150	W
Peak Diode Recovery $dV/dt^c$			$dV/dt$	5.5	V/ns
Operating Junction and Storage Temperature Range			$T_J, T_{stg}$	-55 to +175	$^\circ\text{C}$
Soldering Recommendations (Peak Temperature)			for 10 s	300 <sup>d</sup>	
Mounting Torque	5-32 or M3 screw			10	lbf · in
				1.1	N · m

THERMAL RESISTANCE RATINGS				
PARAMETER	SYMBOL	TYP.	MAX.	UNIT
Maximum Junction-to-Ambient	$R_{thJA}$	-	62	$^\circ\text{C/W}$
Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	$R_{thCS}$	0.50	-	
Maximum Junction-to-Case (Drain)	$R_{thJC}$	-	1.0	

SPECIFICATIONS ( $T_J = 25\text{ }^\circ\text{C}$ , unless otherwise noted)						
PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
<b>Static</b>						
Drain-Source Breakdown Voltage	$V_{DS}$	$V_{GS} = 0\text{ V}, I_D = 250\text{ }\mu\text{A}$	100	-	-	V
$V_{DS}$ Temperature Coefficient	$\Delta V_{DS}/T_J$	Reference to 25 $^\circ\text{C}$ , $I_D = 1\text{ mA}$	-	0.13	-	V/ $^\circ\text{C}$
Gate-Source Threshold Voltage	$V_{GS(th)}$	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250\text{ }\mu\text{A}$	2.0	-	4.0	V
Gate-Source Leakage	$I_{GSS}$	$V_{GS} \approx \pm 20\text{ V}$	-	-	$\pm 100$	nA
Zero Gate Voltage Drain Current	$I_{DSS}$	$V_{DS} = 100\text{ V}, V_{GS} = 0\text{ V}$	-	-	25	$\mu\text{A}$
		$V_{DS} = 80\text{ V}, V_{GS} = 0\text{ V}, T_J = 150\text{ }^\circ\text{C}$	-	-	250	
Drain-Source On-State Resistance	$R_{DS(on)}$	$V_{GS} = 10\text{ V}, I_D = 17\text{ A}^b$	-	-	0.077	$\Omega$
Forward Transconductance	$g_{fs}$	$V_{DS} = 50\text{ V}, I_D = 17\text{ A}^b$	8.7	-	-	S

БР – 02069964 – 12.03.01 – 05 – 18

Параметры транзистора  
IRF540

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
Разраб.		Зубков М. К.		
Провер.		Падеров В. П.		
Т. Контр.				
Реценз.				
Н. Контр.		Шестеркина А. А.		20.06.18
Утверд.		Беспалов Н. Н.		22.06.18

Лит.	Масса	Масштаб
Лист 1	Листов 2	

МГУ им. Н. П. Огарёва

Перв. примен.  
Справ. №

Dynamic							
Input Capacitance	$C_{iss}$	$V_{GS} = 0 V,$ $V_{DS} = 25 V,$ $f = 1.0 MHz, \text{ see fig. 5}$		-	1700	-	pF
Output Capacitance	$C_{oss}$			-	560	-	
Reverse Transfer Capacitance	$C_{rss}$			-	120	-	
Total Gate Charge	$Q_g$	$V_{GS} = 10 V$	$I_D = 17 A, V_{DS} = 80 V,$ see fig. 6 and 13 <sup>b</sup>	-	-	72	nC
Gate-Source Charge	$Q_{gs}$			-	-	11	
Gate-Drain Charge	$Q_{gd}$			-	-	32	
Turn-On Delay Time	$t_{d(on)}$	$V_{DD} = 50 V, I_D = 17 A$ $R_g = 9.1 \Omega, R_D = 2.9 \Omega, \text{ see fig. 10}^b$		-	11	-	ns
Rise Time	$t_r$			-	44	-	
Turn-Off Delay Time	$t_{d(off)}$			-	53	-	
Fall Time	$t_f$			-	43	-	
Internal Drain Inductance	$L_D$	Between lead, 6 mm (0.25") from package and center of die contact 		-	4.5	-	nH
Internal Source Inductance	$L_S$			-	7.5	-	
Drain-Source Body Diode Characteristics							
Continuous Source-Drain Diode Current	$I_S$	MOSFET symbol showing the integral reverse p - n junction diode 		-	-	28	A
Pulsed Diode Forward Current <sup>a</sup>	$I_{SM}$			-	-	110	
Body Diode Voltage	$V_{SD}$	$T_J = 25 \text{ }^\circ\text{C}, I_S = 28 A, V_{GS} = 0 V^b$		-	-	2.5	V
Body Diode Reverse Recovery Time	$t_{rr}$	$T_J = 25 \text{ }^\circ\text{C}, I_F = 17 A, di/dt = 100 A/\mu s^b$		-	180	360	ns
Body Diode Reverse Recovery Charge	$Q_{rr}$			-	1.3	2.8	$\mu\text{C}$
Forward Turn-On Time	$t_{on}$	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by $L_S$ and $L_D$ )					

Подпись и дата  
Инв. № дубл.  
Взам. инв. №  
Подпись и дата  
Изм. Лист № докум. Подпись Дата

БР – 02069964 – 12.03.01 – 05 – 18

Параметры транзистора

IRF540

Лит. Масса Масштаб

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			
Разраб.		Зубков М.К.					
Провер.		Падеров В. П.					

№ строки	Формат	Обозначение	Наименование	Кол. листов	Прим
1			Документация текстовая		
2					
3	A4	БР-02069964-12.03.01-05.18	Пояснительная записка	25	
4					
5			Документация графическая		
6					
7	A4	БР-02069964-12.03.01-05.18 ЭЗ	Схема электрическая	1	
8			принципиальная		
9			малогобаритного измерителя		
10					
11	A4	БР-02069964-12.03.01-05.18	Перечень элементов	1	
12			малогобаритного измерителя		
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20					
21					
22					
23					
24					
25					
26					
27					
28					

<b>БР-02069964-12.03.01-05-18</b>				
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
Разраб.		Зубков М. К.		15.01.18
Провер.		Падеров В. П.		16.01.18
Н. контр.		Шестеркина А.А.		20.06.18
Утверд.		Беспалов Н. Н.		20.06.18

Разработка малогабаритного измерителя времени обратного восстановления диодов средней мощности		
Лит	Лист	Листов
1	1	1
<b>МГУ им Огарева</b>		