

обеспечивающая метрологическую прослеживаемость измерений. В зависимости от результатов калибровки выдается соответствующий документ: при положительных результатах – свидетельство о калибровке, а при отрицательных – протокол калибровки.

#### Литература

1. Об утверждении Правил осуществления метрологической оценки в виде работ по калибровке средств измерений : Постановление государственного комитета по стандартизации.

2. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Основные методы определения правильности стандартного метода измерений : СТБ ИСО 5725-4.

3. Системы менеджмента. Менеджмент измерений. Анализ измерительных систем : СТБ 2450-16.

4. Государственная поверочная схема для средств измерений температуры : ГОСТ 8.558.

5. Система обеспечения единства измерений Республики Беларусь. Калибровка средств измерений. Организация и порядок проведения : СТБ 8014.

6. Сита контрольные. Технические требования и испытания. Часть 1. Сита контрольные из металлической проволочной сетки : СТБ ISO 3310-1-2019. – 2019.

7. Сетки проволочные тканые с квадратными ячейками : ГОСТ 6613-89.

8. Сетки проволочные тканые с квадратными ячейками : ГОСТ 3826-82.

9. Ткани для сит из шелковых и синтетических нитей : ГОСТ 4403-91.

УДК 621.317.799:621.382

### ИЗМЕРЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Лисенков Б.Н.

ОАО «МНИПИ»

Минск, Республика Беларусь

**Аннотация.** Изготовлен макет устройства, который обеспечивает измерение динамических параметров силовых МОП, IGBT, БТ транзисторов и характеристики восстановления силовых диодов.

**Ключевые слова:** динамические параметры силовых полупроводниковых приборов, метод сдвоенного импульса (DPT), время восстановления (reverse recovery).

### MEASUREMENT OF DYNAMIC PARAMETERS OF SEMICONDUCTOR DEVICES

Lisenkov B.N.

JSC "MNIPI"

Minsk, Republic of Belarus

**Abstract.** A prototype of the device has been made, which provides measurement of the dynamic parameters of power MOS, IGBT, BT transistors and recovery characteristics of power diodes.

**Key words:** dynamic parameters of power semiconductor devices, double pulse test, reverse recovery time.

Адрес для переписки: «МНИПИ» Лисенков Б.Н., ул. Я. Коласа, 73, г. Минск, 220113, Республика Беларусь  
e-mail: lisenkovmniipi@tut.by

Применение изделий силовой электроники связано с преобразованием электроэнергии, эффективность которого повышают увеличением частоты переключения, что ставит задачу контроля динамических параметров силовых полупроводниковых приборов (ПП).

Одним из основных требований к системам измерения динамических параметров ПП для контроля продукции на предприятиях электронной промышленности, является автоматизация измерений. Такие системы содержат осциллограф, функциональный генератор, источник напряжения, компьютер, пакет программного обеспечения и модуль (test-fixture), предназначенный для подключения объекта подверженного испытаниям (ОПИ) [1].

Однако стремление к автоматизации связано с большими издержками. Стоимость существующих систем измерения динамических параметров силовых ПП достигает сотен тысяч долларов, что ограничивает их применение в научных лабораториях [1].

Изготовлен макет устройства измерения динамических параметров силовых ПП с ручным управлением, реализующий метод сдвоенного импульса (Double Pulse Test), когда два испытательных импульса разделены паузой. Согласно этому методу энергию, запасенную в накопительном конденсаторе в виде напряжения, преобразуют с помощью дросселя в импульс тока нарастающей амплитуды. При тестировании транзисторов импульс тока прерывают для измерения параметров включения и выключения ОПИ [1; 3].

При измерении времени восстановления обратного сопротивления (reverse recovery) диодов, через ОПИ пропускают постоянный прямой ток, запасенный в дросселе за время 1-го импульса, который затем обрывают путем подачи обратного напряжения 100 В на время 2-го импульса [2]. Постоянный ток протекает через ОПИ в течение паузы между 1-м и 2-м импульсами [4].

Измерение динамических параметров ОПИ выполняют с помощью внешнего осциллографа и

безиндуктивного резистора, преобразующего ток через ОПИ в напряжение [2; 3].

Запуск процесса измерения осуществляют вручную нажатием на кнопку «ИЗМЕРЕНИЕ», либо от внешнего генератора, что позволяет синхронизировать момент измерения с другими устройствами. Импульсы запуска прореживают путем блокировки последующего запуска на 2 сек. При этом скважность импульсов тока через ОПИ, достаточна для рассеяния тепла.

Макет состоит из формирователя импульсов, содержащего блоки: питания (+5 В, ±15 В, ±50 В), синхронизации и высоковольтного напряжения (±150 В) для заряда накопительного конденсатора, а также трех отдельных модулей, каждый из которых обеспечивает подключение определенного типа ОПИ. Модуль подсоединяют к формирователю импульсов многожильным кабелем. Внешний вид формирователя импульсов показан на рисунке 1.



Рисунок 1 – Внешний вид формирователя импульсов со стороны передней панели

Регулировку длительности импульсов и паузы между ними, а также напряжения на ОПИ, осуществляют с помощью переменных резисторов. Плавность регулировки достигают за счет переключения поддиапазонов. Значения параметров испытательных импульсов, установленных вручную, контролируют с помощью внешнего осциллографа [2; 3].

Напряжение заряда накопительного конденсатора обеспечивают с помощью оригинального метода, который позволяет изменять его в широких пределах без применения регулируемого высоковольтного источника [5].

Метод заряда в сочетании с прореживанием импульсов запуска путем их блокировки, положены в основу нового метода измерения динамических параметров транзисторов с предварительной проверкой ОПИ на пробой.

Попытка зарядить накопительный конденсатор при установке в качестве ОПИ уже пробитого транзистора перегружает цепь заряда по току и требует либо увеличения габаритов всего устройства, либо своевременного прекращения заряда.

Согласно новому методу измерения предварительная проверка ОПИ на пробой выполняется путем сравнения продолжительности времени заряда накопительного конденсатора с длительностью порогового интервала, в качестве которого используется интервал блокировки запуска (2 сек). Если время заряда превысит длительность порогового интервала, ток заряда прекращают с одновременной индикацией пробоя ОПИ и

запрещают дальнейшее формирование импульсов запуска до замены ОПИ.

После замены объекта, измерение параметров опять проводят согласно этому методу.

Макет измеряет динамические параметры транзисторов (МОП, IGBT, БТ) и характеристики восстановления диодов согласно таблице 1.

Таблица 1. Измеряемые параметры

Группы	Параметры
Параметры включения	ton, t <sub>d</sub> (on), tr
Параметры выключения	toff, t <sub>d</sub> (off), tf
Заряд затвора	Qg,
Параметры восстановления	trr, Qrr, Irm

Таблица 2. Характеристики макета

Диапазоны установки	Характеристики
Тока, А	0,5–100
Напряжения, В	±100 и ±20
Длительности 1-го имп., мкс	1–300
Длительности паузы., мкс	1–100
Длительности 2-го имп., мкс	1–40

В модулях подключения все элементы расположены на печатной плате, являющейся панелью модуля. Это позволяет до минимума сократить протяженность измерительной цепи, включающей накопительный конденсатор, дроссель, измерительный безиндуктивный резистор, коаксиальные гнезда для осциллографических пробников и гнезда для ОПИ и обеспечивает формирование и измерение испытательных импульсов в наносекундном диапазоне при величине тока до 100 А.

Проводники, по которым распространяются импульсы тока с фронтами наносекундного диапазона и амплитудой выше 10 А, являются источниками мощных наводок, способных исказить результаты измерения. Степень их влияния зависит от взаимного расположения источников и приемников наводок, поэтому топология печатной платы модуля оказывает существенное влияние на погрешность измерений.

Поверх печатной платы в модулях установлена изоляционная панель, которая не нарушает характеристик измерительной цепи и выполняет функции защиты.

Кроме того, в модулях, предназначенных для тестирования транзисторов, предусмотрена многоступенчатая защита драйвера затвора (базы) ОПИ при его пробое в процессе тестирования. Защита драйвера от пробоя высоким напряжением, возникающим на затворе (базе) пробитого ОПИ, обеспечивается с помощью супрессора, гальванической развязки выходного каскада драйвера и ограничения длительности интервалов включения положительного и отрицательного плеч выходного каскада. В течение упомянутых интервалов включения ток высоковольтного источника, поступает через затвор пробитого ОПИ в цепи (±) питания драйвера и изменяет заряд электролитических конденсаторов в этих цепях и напряжения питания драйвера. Длительность интервалов включения выходного

каскада ограничивают, чтобы эти изменения не превысили допустимых значений.

Характеристики макета помещены в таблице 2.

#### Литература

1. PD1500A Series Dynamic Power Device Analyzer/Double-Pulse Tester for discrete IGBT, SiC, and GaN devices, data sheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.keysight.com/find/PD1500A](http://www.keysight.com/find/PD1500A). – Дата доступа: 21.10.2020.

2. Приборы полупроводниковые силовые, методы измерений и испытаний : ГОСТ 24461-80. – М. : Изд. стандартов, 1990.

3. Транзисторы силовые биполярные, методы измерений : ГОСТ 27264-87. – М. : Государственный комитет СССР по стандартам, 1988.

4. Лисенков, Б.Н. Измерение времени восстановления обратного сопротивления силовых диодов / Б.Н. Лисенков, Н.Е. Жданович // Сб. науч. ст. 10-й Междунар. науч. конф. по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного назначения, Минск, 18–19 мая 2023 г. / ГВПК РБ. – Минск : Четыре четверти. – С. 165–168.

5. Лисенков, Б.Н. Метод заряда накопительного конденсатора / Б.Н. Лисенков // Матер. 15-й Междунар. науч.-техн. Конф. «Приборостроение – 2022», Минск, 16–18 нояб. 2022 г. – С. 43–45.

УДК 531.385

## ЗАРУБЕЖНЫЕ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ

Малютин Д.М., Аносов Д.А.

ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»  
Тула, Российская Федерация

**Аннотация.** В работе приведен обзор зарубежных гравиметрических комплексов для измерения ускорения силы тяжести.

**Ключевые слова:** гравиметр, ускорение силы тяжести, гиросtabilизатор.

## FOREIGN GRAVIMETRIC COMPLEXES

Malyutin D.M., Anosov D.A.

Tula state university  
Tula, Russian Federation

**The summary.** In work the review foreign gravimetric complexes for measurement of acceleration of a gravity is resulted.

**Keywords:** gravimeter, a gravity, gyrostabilizer.

Адрес для переписки: Малютин Д.М., пр. Ленина 92, г. Тула, 300002, Российская федерация  
e-mail: [MalyutinDM@yandex.ru](mailto:MalyutinDM@yandex.ru)

В настоящее время во многих странах продолжают активные исследования в области гравиметрии с использованием информационно-измерительных систем на базе корректируемых гиросtabilизаторов для измерения аномалий поля силы тяжести в движении с борта подвижного объекта.

В прикладной геофизике по данным гравиметрических измерений изучаются любые геологические объекты, поскольку они обуславливают аномалии на поверхности Земли: тектонические нарушения, складчатые формы, скрытые осадочными породами, сбросы и сдвиги, погребенный рельеф коренных пород, различные формы интрузий, а также линзы, жилы, штоки и связанные с этими структурами месторождения углеводородного и минерального сырья [1].

Представляет интерес достигнутый к настоящему времени технический уровень зарубежной техники в данной области.

Гравиметрический комплекс KSS 31 (ФРГ) обеспечивает точность гравиметрических измерений на профиле при вертикальных ускорениях до 15 Гал не хуже 0,5 мГал, при вертикальных ускорениях от 15 до 80 Гал не хуже 1 мГал, при вертикальных ускорениях от 80 до 200 Гал не хуже

2 мГал. Динамический диапазон измерений 10 Гал. Скорость смещения нуля пункта гравиметра не более 3 мГал/месяц. При обработке информации используется фильтр Бесселя четвертого порядка с постоянной времени от 10,5 до 75 секунд. Общий вид гравиметрического комплекса KSS 31 представлен на рисунок 1.



Рисунок 1 – Гиросtabilизированный гравиметр KSS 31 фирмы BODENSEEWORK

Гравиметрический комплекс BGM-3 (США) обеспечивает точность гравиметрических измерений в море не хуже 0,2 мГал, чувствительность 0,01 мГал, диапазон измерений 978–983 Гал, предсказуемое смещение нуля пункта гравиметра