

ляет от 15,6 до 13,3 мкВб/мм, а при  $H = 3$  мм и разной  $S$  – от 13,1 до 13,8 мкВб/мм, при этом характер обеих зависимостей не изменяется. Минимум функции  $\Delta\Phi/\Delta b = f(H)$  при  $H \approx 1$  мм, представленный на рис. 3, а, объясняется наличием минимума на обоих графиках рис. 1.

**Выводы.** В настоящей работе установлено, что стальной корпус с вертикальной стенкой толщиной 3 мм и горизонтальной толщиной 1,5 мм обеспечивает рассмотренному преобразователю наибольшую отстройку от вариации внутренних напряжений никелевых покрытий и очень высокую чувствительность даже к их максимальной толщине, достигающей 700 мкм.

УДК 621.382

### АППАРАТУРА И МЕТОД АНАЛИЗА ПЕРЕХОДНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ИССЛЕДОВАНИЯХ ТЕПЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ МОЩНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Бумай Ю.А., Васьков О.С., Нисс В.С.

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

**Аннотация.** Разработан импеданс-спектрометр тепловых процессов и метод, позволяющие на основе переходных электрических процессов анализировать внутреннюю структуру тепловых сопротивлений мощных полупроводниковых приборов и представлять ее в виде спектра тепловых сопротивлений, соответствующих элементам их конструкций. Разработан метод получения профилей распределения теплового потока по элементам структуры приборов.

**Ключевые слова:** мощные полупроводниковые приборы, тепловые параметры, тепловая релаксационная дифференциальная спектроскопия, тепловое сопротивление, аппаратура контроля электротепловых процессов в приборах.

### EQUIPMENT AND METHOD OF ANALYSIS OF TRANSIENT ELECTRICAL PROCESSES IN STUDIES OF THERMAL PARAMETERS OF HIGH-POWER SEMICONDUCTOR DEVICES

Bumai Yu., Vaskov O., Niss V.

*Belarusian National Technical University  
Minsk, Belarus*

**Abstract.** An impedance spectrometer of thermal processes and a method have been developed, which allow analyzing the internal structure of thermal resistances of high-power semiconductor devices on the basis of transient electrical processes and presenting it in the form of a spectrum of thermal resistances corresponding to the elements of their designs. A method for obtaining heat flow distribution profiles for the elements of the device structure has been developed.

**Keywords:** high-power semiconductor devices, thermal parameters, thermal relaxation differential spectroscopy, thermal resistance, equipment for monitoring electrothermal processes in devices.

*Адрес для переписки: Бумай Ю.А., пр. Независимости, 65, г. Минск 220013, Республика Беларусь  
e-mail: yuabumai@bntu.by*

Способность отводить тепло от кристаллов мощных полупроводниковых приборов относится к одному из основных сдерживающих факторов силовой электроники, так как перегрев кристалла приводит к быстрой деградации, резкому снижению времени работы или отказу приборов. Это приводит к необходимости анализа структуры внутреннего теплового сопротивления для таких приборов. В связи с этим в БНТУ разработан импеданс-спектрометр тепловых процессов,

### Литература

1. Лухвич, А. А. Возможности магнитодинамического метода контроля толщины покрытий с неоднородными свойствами (эксперимент) / А. А. Лухвич, О. В. Булатов, А. Л. Лукьянов // Дефектоскопия. – 2009. – № 11. – С. 46–53.
2. Булатов, О. В. Влияние толщины стенки стального корпуса преобразователя магнитодинамического толщиномера на краевой эффект / О. В. Булатов // Приборостроение – 2020 : материалы 13 международной науч.-техн. конф., Минск, 18–20 ноября 2020 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол. : О.К. Гусев (председатель) [и др.]. – Минск, 2020. – С. 21–22.

диодных излучателях, и других изделиях силовой электроники при циклическом изменении температуры окружающей среды.

Разработанная аппаратура предназначена для неразрушающего диагностического контроля тепловых параметров полупроводниковых приборов различного типа с использованием переходных электрических процессов, обусловленных разогревом полупроводниковых приборов проходящими через них импульсными токами. С помощью импеданс-спектрометра получают временные зависимости изменения напряжения на  $p-n$ -переходе, которые дают возможность анализа путей прохождения теплового потока по элементам структуры. На измеряемый образец подаются импульсы тока в виде ступенек. В каждый момент времени из изменения напряжения на  $p-n$ -переходе с использованием  $K$ -фактора, представляющего собой изменение напряжения на переходе при изменении температуры на 1 К на фиксированном токе, рассчитывается температура перегрева активной области прибора. Значения  $K$ -фактора получаются на основе анализа импульсных вольтамперных характеристик (ВАХ), для температурного интервала 20–85 °С. Импульсные ВАХ измеряются с использованием импульсов напряжения прямоугольной формы длительностью от 1 до 100 мкс с частотой следования 1 кГц.

Для повышения чувствительности аппаратуры и расширения динамического диапазона, с целью измерения малых изменений тепловых параметров полупроводниковых приборов, использовался быстродействующий, высокочувствительный АЦП, позволяющий производить 24-х разрядную дискретизацию входных сигналов.

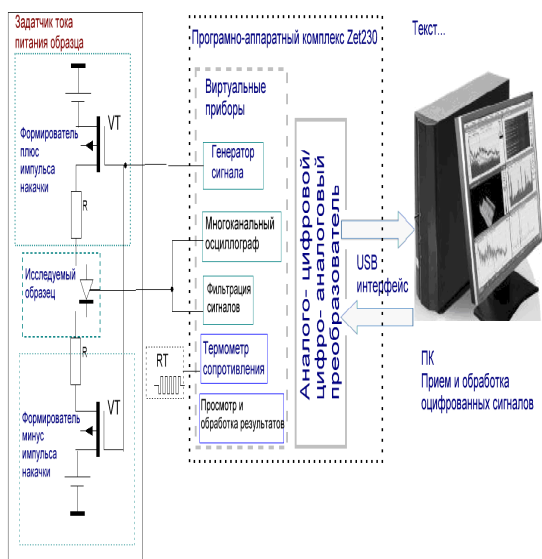


Рисунок 1 – Структурная схема аппаратуры для исследования малых изменений тепловых параметров мощных полупроводниковых приборов

Спектральные измерения связаны с обработкой и регистрацией большого объема аналоговых и цифровых данных. Исследования электротепловых спектров в мощных полупроводниковых приборах выполнялось на базе программно-аппаратного комплекса ZETLab (<http://www.zetms.ru/zetlab>), предоставляющего собой виртуальную лабораторию с мощными средствами для визуализации, спектрального анализа, измерения электрических параметров, генерации, записи и воспроизведения сигналов. Основу измерительной системы составляет блок преобразования данных в состав которого входит 24-разрядный модуль АЦП-ЦАП, с разрешением  $10^{-6}$  в /  $10^{-5}$  с. В такой системе роль измерительного устройства сводится к оцифровке сигналов, а их обработка и вывод результатов на экран осуществляется программными средствами, а сами приборы являются виртуальными. Виртуальные приборы, представляющие собой программы, для решения задач измерения и управления, из состава ZET LAB обрабатывают сигналы, поступающие на входные каналы системы для исследования электротепловых спектров. Программы АЦП (модуль Zet230) выполняют преобразование в цифровую форму входных данных и согласуют интерфейс связи с компьютером.

Программа многоканальный осциллограф предназначена для оценки формы нескольких сигналов и измерения мгновенных значений и позволяет регистрировать быстропротекающие процессы с временным разрешением 10 мкс.

Программа генератор сигналов предназначена для формирования сигналов различной формы, амплитуды и частоты на выходных каналах устройств ZET. В программе генератор сигналов реализована возможность получения на выходе сложных сигналов различной формы и длительности при генерации сигналов из файлов. Файл может быть, как двоичным (записанные ранее реализации сигналов), так и текстовым.

Программа фильтрации создает дополнительные виртуальные каналы, в которых и производится обработка сигналов. Все сигналы реальные и виртуальные имеют внутреннюю синхронизацию, что позволяет проводить их совместную обработку. Программа просмотра и обработки результатов позволяет: загружать одновременно несколько файлов данных, полученных с помощью ZETLab; копировать и вставлять данные из программ ZETLab выполняющихся в реальном времени; просматривать данные в графическом виде; редактировать данные в табличном виде; объединять графики с пересчетом масштабов по частоте и времени; проводить различные операции со столбцами данных – суммировать, вычитать, сглаживать, выполнять различные математические операции, рассчитывать различные параметры.

Результаты выводятся на экран компьютера в виде 12-звенной электротепловой RC-модели (Кауера и Фостера), где  $R$  – тепловое сопротивление,  $C$  – теплоемкость.

Метод и аппаратура применимы при разработке и освоении новых изделий, на стадии совершенствования технологических процессов монтажа кристаллов полупроводниковых приборов и повышения их надежности при термоиспытаниях для анализа структуры теплового сопротивления многослойных полупроводниковых приборов, исследования изменения тепловых параметров МОП транзисторов при термоиспытаниях, анализа качества слоя посадки кристаллов мощных силовых приборов. Данный метод обладает рядом преимуществ перед другими ме-

тодами измерения тепловых характеристик приборов:

- является экспрессным и неразрушающим;
- позволяет определить внутреннее и внешнее тепловое сопротивление приборов, а также их структуру, зависящую путей прохождения теплового потока по элементам как самого устройства, так и внешнего теплоотвода и представить в виде спектра, подобно оптическому;
- позволяет оценить сечение теплового потока в разных областях устройства и внешнего теплоотвода;
- использование больших импульсных токов (в режимах близких к предельно допустимым) позволяет обнаружить области шнурования тока и выявить потенциально ненадежные приборы.

УДК 620.179.14

### ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕРОДА НА ПОЛЕВЫЕ МАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРЯЧЕКАТАННОЙ СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТОЙ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ

Бурак В.А.<sup>1</sup>, Короткевич З.М.<sup>1</sup>, Коровицкий В.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

**Аннотация.** Исследовано изменение таких полевых магнитных величин как коэрцитивная сила, напряженность магнитного поля, соответствующая максимальному значению магнитной проницаемости, и величины напряженностей поля, при которых петля магнитного гистерезиса имеет наибольшую ширину, с ростом содержания углерода в горячекатаных среднеуглеродистых конструкционных сталях. Установлено, что коэрцитивная сила и напряженность магнитного поля, соответствующая максимальному значению магнитной проницаемости, могут применяться для выявления изделий, отличающихся по материалу изготовления, при условии, что контролируемые изделия не были подвергнуты термической обработке, значительно изменяющей структурное состояние.

**Ключевые слова:** магнитный неразрушающий контроль, импульсное намагничивание, коэрцитивная сила, конструкционная сталь.

### INFLUENCE OF CARBON QUANTITY ON MAGNETIC FIELD STRENGTH CHARACTERISTICS OF HOT-ROLLED MEDIUM CARBON CONSTRUCTION STEEL

Burak V.<sup>1</sup>, Korotkevich Z.<sup>1</sup>, Korovitskiy V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Applied Physics of the NAS of Belarus

<sup>2</sup>Belorussian National Technical University  
Minsk, Belarus

**Abstract.** The changes in the coercive force, the magnetic field strength corresponding to the magnetic permeability maximum value and the field strengths of the magnetic hysteresis loop largest width with increasing the carbon content in hot-rolled medium-carbon structural steels were investigated. It is defined that the coercive force and the magnetic field strength corresponding to the magnetic permeability maximum value can be used to identify articles that have different material of manufacture if the testing articles were not under heat treatment which leads to significant changes in the structural state.

**Key words:** magnetic non-destructive testing, pulse magnetization, coercive force, construction steel.

Адрес для переписки: Короткевич З.М., ул. Академическая, 16, г Минск 220072, Республика Беларусь  
e-mail: kzm@iapf.bas-net.by

Изучение влияния содержания углерода и легирующих элементов на механические и магнитные характеристики различных марок сталей расширяет возможности магнитного контроля для решения задач по определению их химического состава и соответствующей марки.

Конструкционные среднеуглеродистые стали являются одними из наиболее популярных материалов для изготовления деталей различного назначения. Так как для этих марок сталей характерно содержание легирующих элементов в количествах, не оказывающих значительного