

На правах рукописи

**ГАВРИКОВ Андрей Анатольевич**

**СПОСОБЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОВОГО ИМПЕДАНСА  
СВЕТОДИОДОВ НА ОСНОВЕ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ  
МОДУЛЯЦИИ ГРЕЮЩЕЙ МОЩНОСТИ**

Специальность 05.11.01 – Приборы и методы измерения по видам измерения  
(электрические измерения)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Ульяновск 2012

Работа выполнена в Ульяновском государственном техническом университете

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Смирнов Виталий Иванович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент  
Киселев Сергей Константинович  
кандидат технических наук, доцент  
Ефимов Александр Владимирович

Ведущая организация: ОАО «Ульяновское конструкторское бюро  
приборостроения»

Защита диссертации состоится «15» февраля 2012 г в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.277.01 при Ульяновском государственном техническом университете по адресу: 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32, аудитория 211.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ульяновского государственного технического университета.

Автореферат разослан «\_\_\_» января 2012 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д.т.н., профессор

Смирнов В. И.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Полупроводниковые светодиоды в настоящее время находят самое широкое применение, начиная от источников освещения и заканчивая системами обработки и передачи информации. Основной привлекательной чертой светодиодной технологии является принципиально более высокий по сравнению с альтернативными технологическими решениями уровень светоотдачи, что способно привести к значительным экономическим и социальным эффектам. Большой вклад в развитие светодиодов внесли О.В. Лосев, Ж.И. Алферов, Д.З. Гарбузов, Г. Кремер, С. Килби, Н. Холоньяк, Ж. Панков, И. Акасаки, С. Накамура, Г.В. Сапарин, М.В. Чукичев и др.

Эффективность излучения и скорость деградации светодиодов сильно зависят от температуры активной области кристалла. Параметром, определяющим температуру  $p$ - $n$ -перехода в светодиоде, является тепловое сопротивление. Измерение данного параметра приобретает особую важность для мощных светодиодов, у которых большая рассеиваемая мощность может вызвать сильный перегрев кристалла с последующими негативными последствиями.

В России производство светодиодов бурно развивается и задача контроля их теплофизических параметров стала очень актуальной. Одно из наиболее важных направлений развития светодиодов – повышение мощности, что сопровождается соответствующим уменьшением их теплового сопротивления. Поэтому требования к чувствительности и точности измерения этого важного теплофизического параметра существенно возросли. Несмотря на важность задачи, отечественные средства измерения теплового сопротивления отсутствуют. Стандартный способ измерения по ГОСТ 19656.18-84 (Диоды полупроводниковые СВЧ. Методы измерения теплового сопротивления) не обеспечивает необходимую точность измерений, соответствующую современным требованиям.

За рубежом наибольшее распространение получил метод измерения теплового сопротивления (стандарт JE51-1), заключающийся в пропускании через диод ступенчато изменяющегося электрического тока и измерения отклика на это воздействие – температуры  $p$ - $n$ -перехода в процессе нагрева до достижения стационарного состояния. Температура перехода определяется косвенным способом на основе измерения температурочувствительного параметра (ТЧП), в качестве которого используется прямое падение напряжения на диоде при малом измерительном токе. Анализ кривой нагрева позволяет определить вклад отдельных элементов конструкции светодиода в общее тепловое сопротивление. Однако, учитывая общую тенденцию снижения теплового сопротивления светодиодов, удовлетворять возросшим требованиям по точности измерения становится все проблематичнее. Требуются новые альтернативные методы измерения теплового сопротивления, в частности методы, использующие модуляцию греющей мощности по какому-либо закону. Для светодиодов наиболее просто и эффективно реализуется широтно-импульсная модуляция (ШИМ) греющей мощности, осуществляемая по гармоническому или линейному закону.

**Цель диссертационной работы.** Цель работы состоит в разработке и исследовании модуляционных способов измерения теплофизических параметров светодиодов и создании на их основе автоматизированных средств измерения теплового импеданса, обеспечивающих необходимые точность и диапазон измерения.

Поставленная цель достигается решением **следующих задач:**

1. Анализ существующих методов и средств измерения теплофизических параметров светодиодов.

2. Разработка способов измерения теплового сопротивления, использующих ШИМ модуляцию греющей мощности, осуществляемую по гармоническому или линейному законам.

3. Исследование влияния различных режимов нагрева на чувствительность и точность способов измерений теплового сопротивления, использующих ШИМ греющую мощность.

4. Реализация разработанных способов измерения теплового импеданса в виде измерительных устройств, обладающих необходимыми функциональными возможностями и метрологическими характеристиками.

5. Сравнительный анализ разработанных в диссертации средств измерения теплового импеданса светодиодов с аналогами.

**Методы исследований.** В ходе выполнения работы использовались принципы теплоэлектрической аналогии, теория радиотехнических цепей и сигналов, интегральные преобразования Фурье, теория погрешностей и статистическая обработка результатов измерений. При разработке программного обеспечения измерительного комплекса использовались языки программирования Си и С++. Обработка результатов измерений осуществлялась в пакете SciLab.

**Научная новизна работы.**

1. Предложен способ измерения теплового импеданса светодиодов, заключающийся в их нагреве гармонической ШИМ мощностью и измерении отклика на это воздействие – переменной составляющей температуры перехода с последующим вычислением основной гармоники, что позволяет определить модуль и фазу теплового импеданса.

2. На основе теплоэлектрической аналогии произведено компьютерное моделирование кинетики нагрева полупроводникового диода ШИМ греющей мощностью, которое подтвердило корректность способа измерения теплового сопротивления и позволило произвести оценку влияния режимов нагрева на чувствительность и точность способа.

3. Показано, что зависимость теплового сопротивления от частоты модуляции греющей мощности несет в себе информацию о вкладе отдельных элементов конструкции светодиода в его общее тепловое сопротивление. Разработана методика анализа экспериментально полученных спектров, позволяющая надежно различить отдельные компоненты теплового сопротивления.

4. Показано, что результаты измерения теплового сопротивления, полученные частотным методом с использованием гармонической ШИМ мощности, могут быть преобразованы к формату стандарта JESD51-1, использующего нагрев ступенчато изменяющейся мощностью.

#### **Практическая значимость работы.**

1. Разработаны и изготовлены средства измерения теплового сопротивления светодиодов, которые позволяют разработчикам светотехнических изделий контролировать температуру активной области изделий и дают возможность проектировать их с наиболее эффективным теплоотводом.

2. Разработан и изготовлен автоматизированный измерительный комплекс, который позволяет предприятиям – производителям светодиодов обеспечить выборочный или полный контроль теплофизических параметров выпускаемой продукции.

3. Разработано программное обеспечение измерительного комплекса, которое может служить основой при разработке управляющих программ аналогичных микропроцессорных измерительных приборов.

#### **Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Способы измерения теплового импеданса светодиодов, заключающиеся в использовании нагрева объекта гармонической или линейной ШИМ мощностью и измерении отклика на это воздействие – переменной составляющей температуры перехода светодиода.

2. Математическая модель кинетики нагрева светодиодов гармонической ШИМ мощностью и результаты ее анализа, позволяющие оценить влияние различных режимов нагрева на точность определения теплового импеданса светодиодов.

3. Алгоритмы и их программная реализация, обеспечивающие функционирование автоматизированного комплекса для измерения теплового импеданса светодиодов.

4. Частотный метод измерения теплового сопротивления, использующий нагрев гармонической ШИМ мощностью, и временной метод, использующий нагрев ступенчато изменяющейся мощностью (стандарт JESD51-1), дают одинаковые результаты, что подтверждает адекватность частотного метода.

**Апробация работы.** Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на школе-семинаре «Актуальные проблемы физической и функциональной электроники» (Ульяновск, 2005-2007 гг.); Всероссийской научно-практической конференции «Устройства измерения, сбора и обработки сигналов в информационно-управляющих комплексах» (Ульяновск 2011 г.), Всероссийской научно-практической конференции «Методы и средства измерения физических величин» (Н.Новгород, 2011 г.), международной школе-конференции «Фундаментальная математика и ее приложения в естествознании» (Уфа, 2011 г.).

### **Реализация и внедрение результатов работы.**

Результаты диссертационной работы использованы в ЗАО «Связь инжиниринг М» (г. Москва) в виде устройства измерения теплового импеданса полупроводниковых светодиодов с заданными заказчиком техническими характеристиками.

Результаты диссертационной работы использованы в Ульяновском филиале Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН при проведении исследований по тематическому плану НИР.

Результаты диссертационной работы использованы в Ульяновском государственном техническом университете при выполнении проекта 2.1.2/13930 «Синтез методов и средств идентификации и измерения параметров нелинейных тепловых моделей гетеропереходных светодиодов» аналитической ведомственной целевой программы Рособразования РФ «Развитие научного потенциала высшей школы (2011 год)».

**Личный вклад автора.** Основные результаты диссертационной работы, включая разработку программного обеспечения автоматизированного измерительного комплекса, компьютерное моделирование кинетики нагрева светодиодов, моделирование частотного и временного методов измерения теплового сопротивления, получены автором лично. Остальные результаты, включая проектирование и апробацию комплекса, получены при его непосредственном участии.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 14 работ, в том числе 2 статьи в изданиях из перечня ВАК и 1 патент РФ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 114 наименований и 3 приложений. Общий объем диссертации составляет 129 страниц, включая 5 таблиц и 47 рисунков.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, поставлена цель и дана общая характеристика работы, включая научную новизну и практическую значимость полученных результатов, сформулированы научные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** диссертации носит обзорный характер. В ней рассмотрены особенности конструкций светодиодов и влияние температуры на их характеристики. Отмечается важность измерения не только общего теплового сопротивления, но и отдельных его составляющих, соответствующих элементам конструкции светодиода. Особое внимание уделено методам измерения теплового сопротивления и средствам их реализации. Отмечается, что за рубежом наибольшее распространение получил измерительный комплекс T3Ster, в котором реализован стандарт JESD51-1. Прибор обеспечивает возможность определения прямого падения напряжения на  $p-n$ -переходе при микросекундном временном

разрешении и позволяет с точностью до долей К/Вт рассчитывать тепловое сопротивление светодиода и отдельных звеньев его тепловой цепи. Вместе с тем необходимость измерения небольших изменений температуры перехода при отсутствии возможности процедуры усреднения в процессе ее измерения ограничивает его возможности.

**Во второй главе** представлены результаты исследований, направленных на разработку модуляционных методов измерения теплового сопротивления, в которых греющая светодиод мощность изменяется по какому-нибудь закону. Наиболее просто реализуются линейный и гармонический законы, в которых мощность линейно нарастает во времени, либо изменяется синусоидально. Суть способа на основе использования гармонической ШИМ греющей мощности заключается в следующем.

Через светодиод в прямом направлении пропускается последовательность импульсов тока  $I$ , длительность  $t_{и}$  которых изменяется по гармоническому закону:

$$t_{и} = t_{и\text{ср}} (1 + a \cdot \sin\omega t), \quad (1)$$

где  $t_{и\text{ср}}$  – средняя длительность импульсов;  $a$  – коэффициент, определяющий глубину модуляции греющей мощности (отношение разности максимальной и минимальной длительностей к периоду следования);  $\omega$  – циклическая частота модуляции. Период следования  $T_{\text{сл}}$  импульсов и амплитудное значение  $I_{\text{гр}}$  греющего тока на диоде поддерживаются постоянными (рис. 1а).

Учитывая, что вариации напряжения на светодиоде, вызванные циклическим изменением температуры активной области, существенно меньше напряжения в момент протекания греющего тока, можно принять напряжение на вершине греющих импульсов  $U_{\text{гр}}$  постоянным. Тогда средняя за период модуляции греющая мощность  $\bar{P}(t)$  будет также изменяться по гармоническому закону (рис. 1б):

$$\bar{P}(t) = \frac{1}{T_{\text{сл}}} \int_0^{T_{\text{сл}}} P(t) dt = I_{\text{гр}} U_{\text{гр}} \frac{t_{и}}{T_{\text{сл}}} = P_{\text{ср}} (1 + a \cdot \sin\omega t) = P_{\text{ср}} + P_1 \cdot \sin\omega t,$$

где  $P_{\text{ср}} = I_{\text{гр}} U_{\text{гр}} \frac{t_{и\text{ср}}}{T_{\text{сл}}}$  – среднее значение греющей мощности;

$P_1 = P_{\text{ср}} \cdot a$  – амплитуда колебаний греющей мощности.

Модуляция греющей мощности вызывает соответствующие изменения температуры электронно-дырочного перехода светодиода, сдвинутые по фазе относительно мощности (рис. 1в). Сдвиг фаз зависит от частоты модуляции и тепловых постоянных конструктивных элементов светодиода. Температура  $p$ - $n$ -перехода относительно корпуса или окружающей среды определяются на основе измерений ТЧП, в качестве которого выступает прямое напряжение  $U_{\text{ТЧП}}$  на светодиоде при протекании через него малого измерительного тока  $I_{\text{изм}}$ . При известном температурном коэффициенте напряжения, которое определяет

ся по стандартной методике, по измеренным значениям  $U_{\text{ТЧП}}$  можно определить температуру  $p$ - $n$ -перехода.

Измерение ТЧП производится в паузах между греющими импульсами с небольшой относительно среза импульсов временной задержкой (рис. 1г), необходимой для завершения переходных электрических процессов, связанных с переключением светодиода из режима нагрева в режим измерения ТЧП. Напряжение  $U_{\text{ТЧП}}(t)$  на  $p$ - $n$ -переходе в паузах между импульсами греющего тока будет повторять (с обратным знаком) изменение температуры  $p$ - $n$ -перехода.

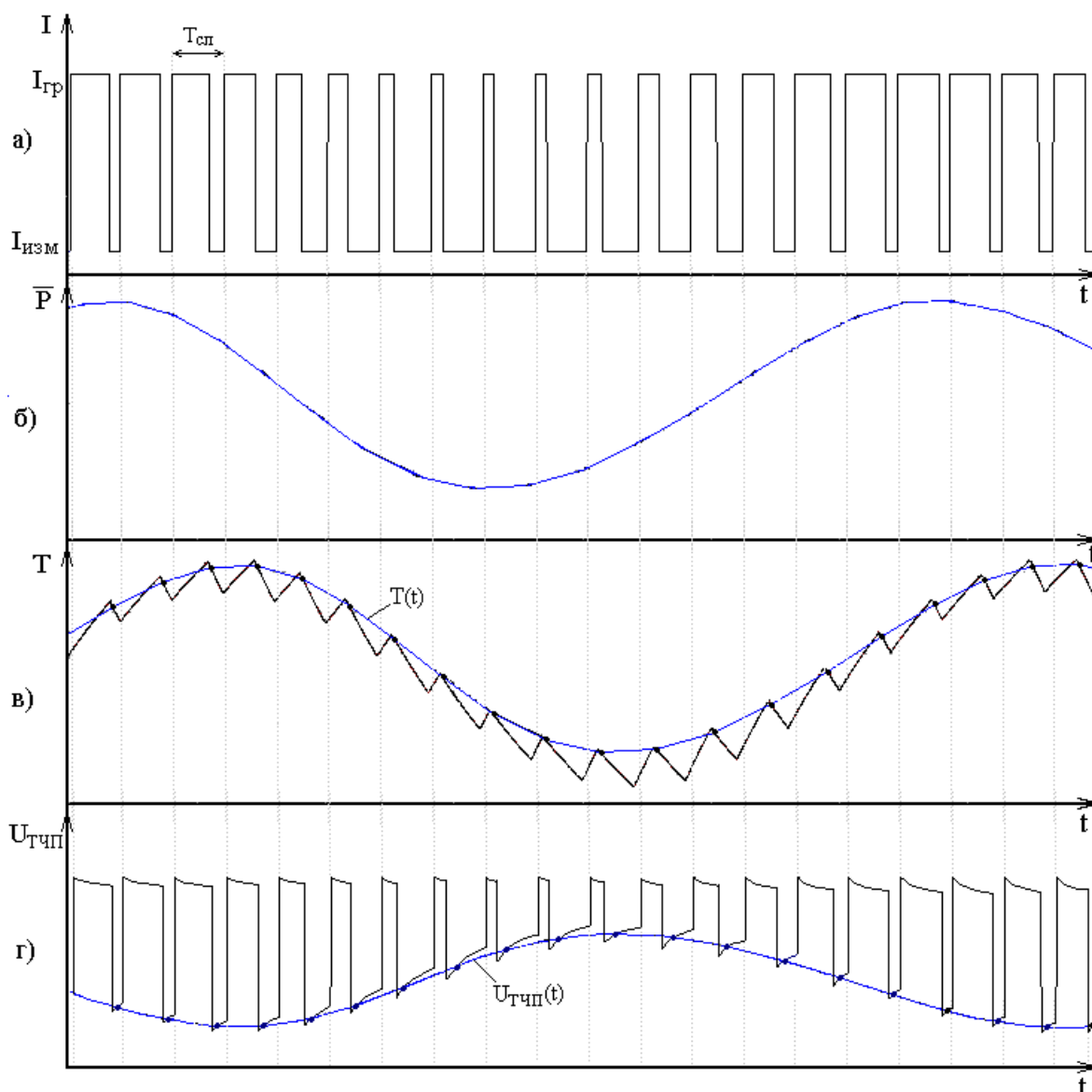


Рис. 1. Временные диаграммы, поясняющие способ измерения теплового импеданса светодиодов на основе их разогрева гармонической ШИМ мощностью

Модуль теплового импеданса  $|Z_T(\omega)|$  будет определяться отношением первых гармоник температуры  $T_1(\omega)$  и греющей мощности  $P_1(\omega)$  на частоте модуляции:



$$|Z_T(\omega)| = \frac{T_1(\omega)}{P_1(\omega)}.$$

Для определения первой гармоники температуры  $T_1(\omega)$  воспользуемся дискретным преобразованием Фурье:

$$A_1(\omega) = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N T(t_i) \cdot \cos\left(2\pi \frac{i}{N}\right), \quad B_1(\omega) = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N T(t_i) \cdot \sin\left(2\pi \frac{i}{N}\right),$$

$$T_1(\omega) = \sqrt{A_1^2(\omega) + B_1^2(\omega)},$$

где  $A_1(\omega)$  и  $B_1(\omega)$  – вещественные и мнимые Фурье-трансформанты на частоте модуляции  $\omega$ ;  $T(t_i)$  – значения температуры в моменты времени  $t_i$ .

Тангенс фазы  $\varphi$  теплового импеданса определяется отношением мнимых и вещественных Фурье-трансформант  $B_1(\omega)$  и  $A_1(\omega)$ , откуда

$$\varphi = \arctg \frac{B_1(\omega)}{A_1(\omega)}.$$

Для проверки корректности способа измерения теплового сопротивления светодиодов, основанного на его нагреве гармонической ШИМ мощностью, а также для определения степени влияния на точность и чувствительность метода таких параметров, как период следования греющих импульсов, частота и коэффициент модуляции, количество греющих импульсов за период модуляции было произведено компьютерное моделирование кинетики нагрева светодиода. В основе построения модели лежит известный принцип теплоэлектрической аналогии, согласно которому процессы распространения тепла в светодиоде по пути «активная область кристалла – кристаллодержатель – корпус прибора – радиатор – окружающая среда» происходят аналогично электрическим процессам в схеме замещения, представляющей собой совокупность последовательно соединенных RC-цепочек. Поток тепла аналогичен электрическому току, протекающему по звеньям схемы замещения, электрический потенциал является аналогом температуры. Каждому из слоев структуры или элементов конструкции светодиода, по которым распространяется поток тепла от источника к окружающей среде, соответствует своя RC-цепочка. Электрическое сопротивление  $k$ -й RC-цепочки является аналогом теплового сопротивления  $R_{Tk}$   $k$ -го элемента конструкции, электрическая емкость – аналог теплоемкости  $C_{Tk}$ ; постоянная времени  $k$ -й цепочки  $\tau_k = R_{Tk} \cdot C_{Tk}$  – аналог тепловой постоянной  $k$ -го элемента конструкции.

Анализ тепловой модели показывает, что при протекании через диод последовательности греющих импульсов температура  $k$ -го элемента  $T_k(t)$  на интервале греющего импульса будет определяться выражением:

$$T_k(t) = P \cdot R_{Tk} \cdot (1 - e^{-t/\tau_k}) + T_{kmin} \cdot e^{-t/\tau_k}, \quad (2)$$

где  $T_{kmin}$  – температура  $k$ -го элемента в момент времени, соответствующем фронту греющего импульса (рис. 2). Для первого импульса этот момент времени соответствует началу нагрева  $t = 0$  и  $T_{kmin}(0) = T_{cp}$ , представляет собой начальную температуру светодиода до его разогрева. Для произвольного  $i$ -го греющего импульса температура  $T_{kmin}$  рассчитывается с учетом процессов нагрева и остывания от предшествующих  $(i-1)$  импульсов и пауз.

В момент окончания произвольного  $i$ -го греющего импульса температура  $T_k(t)$  примет максимальное значение  $T_{kmax}$ , равное

$$T_{kmax} = P \cdot R_{Tk} \cdot (1 - e^{-t_n/\tau_k}) + T_{kmin} \cdot e^{-t_n/\tau_k} . \quad (3)$$

На интервале паузы между греющими импульсами, когда выделения мощности в светодиоде нет, происходит процесс его остывания и температура  $k$ -го элемента будет изменяться согласно выражению

$$T_k(t) = T_{kmax} \cdot e^{-t/\tau_k} . \quad (4)$$

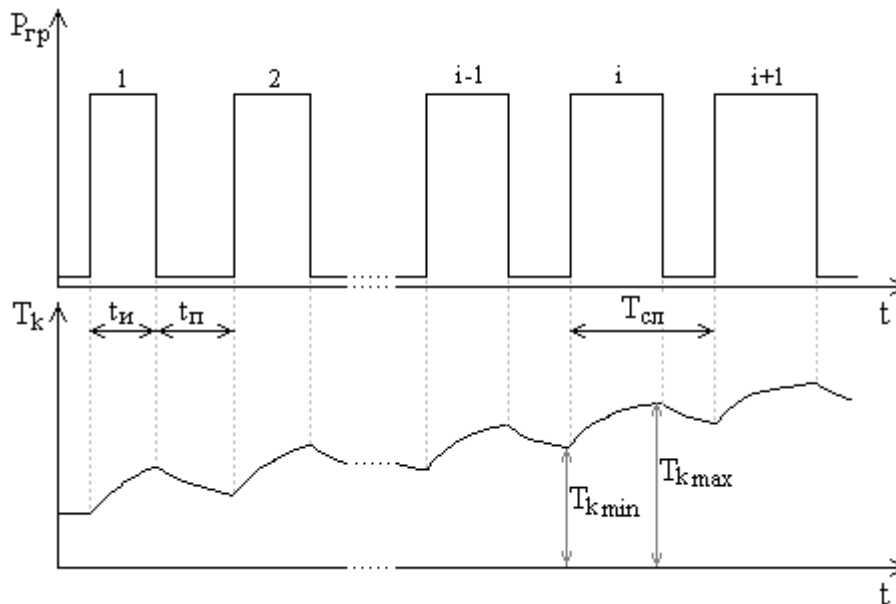


Рис. 2. Кинетика нагрева  $k$ -го элемента конструкции светодиода ШИМ мощностью

В момент окончания паузы  $t_n$  (в момент фронта следующего импульса) температура примет минимальное значение  $T_{kmin}$ :

$$T_k(t_i) = T_{kmin} = T_{kmax} \cdot e^{-t_i/\tau_k} . \quad (5)$$

Особенностью моделирования кинетики нагрева светодиода является то, что длительность греющих импульсов и пауз между ними не остается постоянной, а изменяется по гармоническому закону (1). Алгоритм расчета изменения температуры  $k$ -ого элемента конструкции светодиода заключается в следующем. Вначале по формулам (2) и (4) с учетом (3) и (5) рассчитывается зависимость  $T_k(t)$  на первом периоде следования  $T_{сл}$  греющих импульсов. Величина  $T_{kmin}$  при этом принимается равной температуре окружающей среды. Это позволяет рассчитать температуру  $T_{kmin}$  для следующего периода следования.

Далее вычисляются новые значения длительности  $t_{ni}$  греющего импульса и паузы  $t_{pi}$  по формулам:

$$t_{ni} = t_{icp} \left(1 + a \cdot \sin \frac{2\pi i}{N}\right), \quad t_{pi} = T_{cп} - t_{ni},$$

где индекс  $i$  соответствует номеру греющего импульса;  $t_{icp}$  – средняя длительность импульсов;  $a$  – коэффициент модуляции греющей мощности;  $N$  – количество импульсов на периоде модуляции.

Полученные значения  $t_{ni}$  и  $t_{pi}$  подставляются в выражения (3) и (5), что дает возможность рассчитать зависимость  $T_k(t)$  на втором и последующих периодах следования греющих импульсов. Для определения температуры  $p$ - $n$ -перехода относительно корпуса или окружающей среды производится суммирование  $T_k(t)$  по всем элементам конструкции (звеньям тепловой модели светодиода):

$$T_i(t) = \dot{Q}_{п\delta} + \sum_{k=1}^n T_k(t).$$

Определив в рамках модели амплитуду переменной составляющей температуры перехода  $T_n(t)$  при заданных параметрах модели ( $R_{Tk}$  и  $\tau_k$ ) и законе изменения греющей мощности, можно вычислить тепловое сопротивление и сравнить его с теоретическим значением, полученным согласно выражению

$$R_T = \sqrt{\left(\sum_{k=1}^n \frac{R_{Tk}}{1 + (\omega\tau_k)^2}\right)^2 + \left(\sum_{k=1}^n \frac{R_{Tk}\omega\tau_k}{1 + (\omega\tau_k)^2}\right)^2}.$$

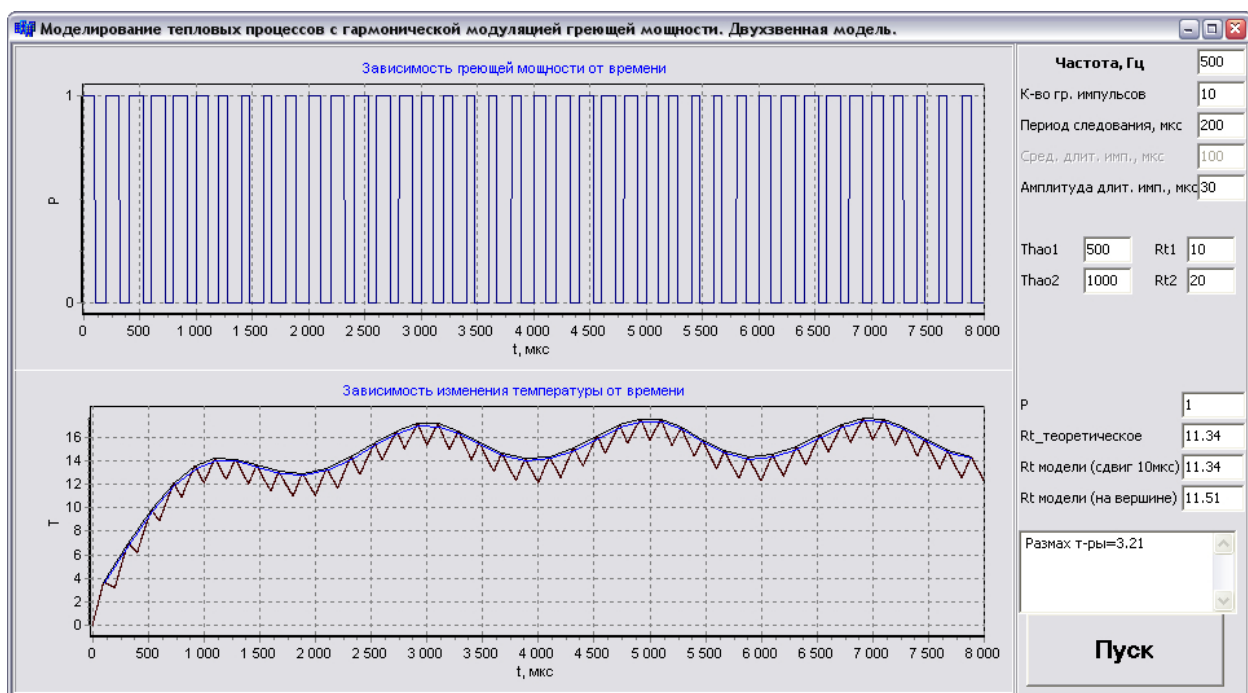


Рис. 3. Интерфейс программы моделирования кинетики нагрева светодиода

Интерфейс программы моделирования кинетики нагрева представлен на рис. 3. Моделирование производилось для двухзвенной модели, имеющей параметры:  $R_{T1} = 10 \text{ К/Вт}$ ;  $\tau_1 = 500 \text{ мкс}$ ;  $R_{T2} = 20 \text{ К/Вт}$ ;  $\tau_2 = 1000 \text{ мкс}$ . Частота модуляции выбиралась из диапазона от 10 до 500 Гц; период следования – от 80 до 200 мкс; амплитуда переменной составляющей длительности импульсов равнялась 30 мкс; мгновенная мощность  $P = 1 \text{ Вт}$ .

Результаты моделирования показали, что способ измерения теплового сопротивления светодиодов, основанный на использовании гармонической ШИМ мощности, обладает погрешностью на уровне 3 %, причем эта величина не зависит от периода следования греющих импульсов, изменяющемся в диапазоне от 80 до 200 мкс. Чувствительность способа уменьшается с ростом частоты модуляции и возрастает с уменьшением периода следования при постоянном коэффициенте модуляции. При постоянном периоде следования греющих импульсов чувствительность метода прямо пропорциональна амплитуде переменной составляющей длительности греющих импульсов. При высокой частоте модуляции на точность измерений оказывает влияние количество греющих импульсов за один период модуляции. При допустимой погрешности 2 % и периоде следования 120 мкс количество импульсов за период модуляции не должно быть меньше 14. Это влияние можно существенно уменьшить, если для вычисления амплитуды переменной составляющей температуры использовать дискретное преобразование Фурье.

При высокой частоте модуляции гармонической ШИМ мощности, погрешность измерения теплового сопротивления возрастает из-за небольшого количества импульсов, приходящихся на один период модуляции. Такое негативное влияние проявляется на частотах порядка 700 Гц и выше. Вместе с тем данный диапазон частот представляет большой интерес, так как в нем проявляется составляющая теплового сопротивления светодиода, связанная с активной областью кристалла (тепловое сопротивление «переход-кристалл  $R_{j\text{-chip}}$ »). Однако ее измерение затруднено тем, что величина  $R_{j\text{-chip}}$  для мощных светодиодов обычно не превышает 1 К/Вт, а колебания температуры при номинальных токах составляют десятые доли градуса. Поэтому способ измерения  $R_{j\text{-chip}}$ , основанный на нагреве светодиода гармонической ШИМ мощностью, в области высоких частот модуляции может оказаться недостаточно точным.

Более предпочтительным в этом случае является способ линейной модуляции греющей мощности, суть которого заключается в следующем. Через светодиод в прямом направлении пропускается последовательность импульсов греющего тока, длительность  $t_{и}$  которых изменяется по линейному закону:

$$t_{и} = t_{инач} (1 + k \cdot t),$$

где  $t_{инач}$  – начальная длительность греющих импульсов (длительность первого импульса в последовательности);  $k$  – коэффициент пропорциональности, определяющий относительное приращение длительности.

Средняя за период следования мощность  $\bar{P}(t)$  определяется выражением

$$\bar{P}(t) = \frac{1}{T_{\text{сл}}} \int_0^{T_{\text{сл}}} P(t) dt = I_{\text{гр}} U_{\text{гр}} \frac{t_{\text{инач}}}{T_{\text{сл}}} = \bar{P}_{\text{нач}} (1 + k \cdot t), \quad (6)$$

где  $\bar{P}_{\text{нач}} = I_{\text{гр}} U_{\text{гр}} \frac{t_{\text{инач}}}{T_{\text{сл}}}$  – начальная мощность (мощность первого импульса в последовательности). Так как напряжение на вершине греющих импульсов  $U_{\text{гр}}$  за время измерений практически остается постоянным, то величина  $\bar{P}(t)$  также изменяется по линейному закону.

При достаточно большой частоте следования греющих импульсов тока  $f_{\text{сл}}$ , удовлетворяющей условию  $f_{\text{сл}} \cdot \tau_T \gg 1$  (где  $\tau_T$  – тепловая постоянная времени переход-корпус светодиода) и достаточно медленном нарастании коэффициента заполнения последовательности импульсов через некоторое время  $t \geq 3\tau_T$  тепловой режим светодиода можно считать установившимся. Следствием этого является линейное изменение температуры перехода. Тогда тепловое сопротивление будет определяться выражением

$$R_T = \frac{dT}{dP} = \frac{dT/dt}{dP/dt},$$

где производная  $d\bar{P}/dt$  согласно (6) равна:

$$d\bar{P}/dt = \bar{P}_{\text{нач}} \cdot k = I_{\text{гр}} U_{\text{гр}} \frac{t_{\text{инач}}}{T_{\text{сл}}} \cdot k.$$

Величина  $dT/dt$  определяется по значениям температуры  $T_i$ , измеренной в моменты времени  $t_i$ , с помощью метода наименьших квадратов.

**В третьей главе** рассмотрен автоматизированный комплекс для измерения теплового импеданса светодиодов, который включает в себя микропроцессорный измеритель, предназначенный для генерации греющих импульсов и измерения ТЧП; персональный компьютер и программу управления функционированием комплекса. Внешний вид комплекса представлен на рис. 4.

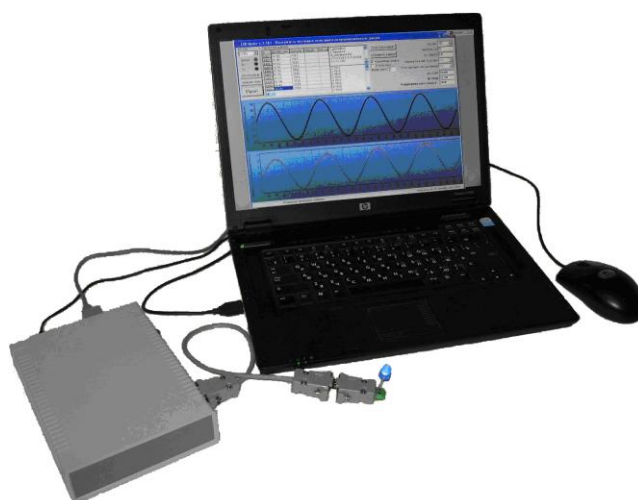


Рис. 4. Внешний вид автоматизированного измерительного комплекса

Структурная схема измерителя представлена на рис. 5. Работа прибора осуществляется под управлением микроконтроллера ATmega 128. При включении прибора производится инициализация периферийных устройств, после чего прибор переходит в режим ожидания поступления информационного пакета данных от компьютера, который включает в себя величину греющего тока, период следования греющих импульсов и их частоту модуляции. Кроме этого пересылаются ряд других параметров, позволяющих таймеру/счетчику в режиме ШИМ сформировать нужную последовательность греющих импульсов, поступающих на светодиод.

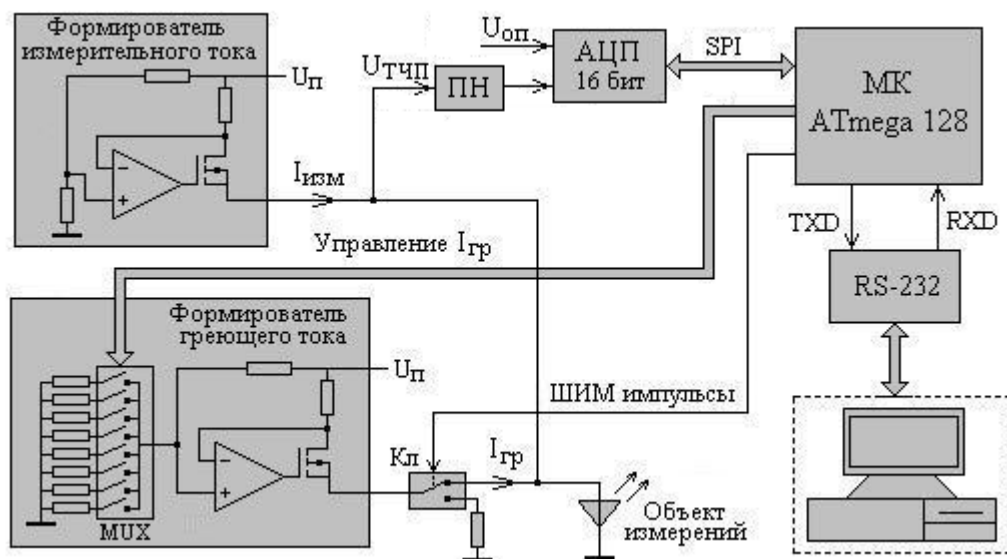


Рис. 5. Структурная схема измерителя теплового импеданса светодиодов

Формирователь измерительных импульсов реализован на основе операционного усилителя (ОУ), в обратную цепь которого включен полевой транзистор. Величина измерительного тока  $I_{изм}$  определяется напряжением на неинвертирующем входе ОУ. По аналогичной схеме реализован и генератор греющего тока  $I_{гр}$ , но напряжение на неинвертирующем входе ОУ может изменяться. Регулирование величины  $I_{гр}$  осуществляется подключением через мультиплексор (MUX) нужного сопротивления, что осуществляется формированием микроконтроллером двоичного кода, задающего номер канала MUX. В измерителе используются два мультиплексора, каждый со своим набором сопротивлений в канале. Это позволяет обеспечить 16 дискретных значений тока в диапазоне от 10 до 550 мА. Кроме того, в измерителе имеется возможность увеличения греющего тока в два раза в каждом из каналов.

Широтно-импульсная модуляция греющих импульсов осуществляется подачей на переключатель Кл от микроконтроллера управляющих ШИМ импульсов. Возможна генерация однократных импульсов заданной длительности или последовательности импульсов, длительность которых изменяется по линейному или гармоническому законам. Основным режимом является модуляция по гармоническому закону.

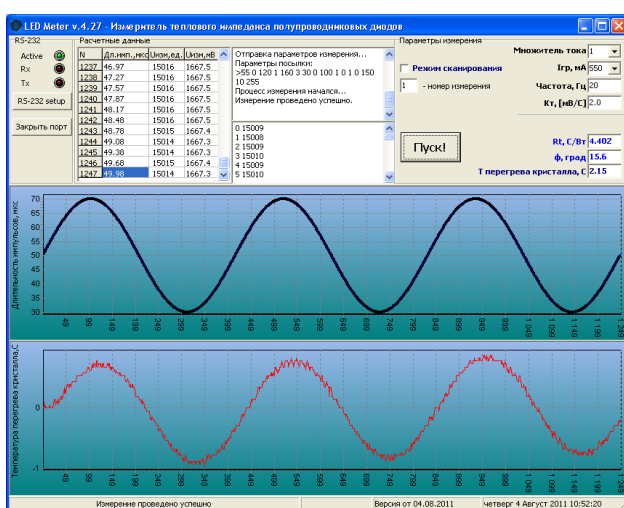
Преобразование измеряемого напряжения в цифровой код, поступающий в микроконтроллер, осуществляется с помощью внешнего 16-разрядного АЦП с последовательным выходом. Время преобразования АЦП составляет 10 мкс. Взаимодействие АЦП с микроконтроллером осуществляется посредством скоростного последовательного интерфейса SPI. Все результаты измерений записываются в оперативную память микроконтроллера и по окончании измерения пересылаются в компьютер для последующей обработки.

Программа управления функционированием комплекса LED Meter позволяет решить такие задачи, как установка режимов работы комплекса, обработка результатов измерения в соответствии с заданными режимами, отображение результатов измерения и обработки в текстовом и графическом виде; ведение базы данных с результатами измерений, определение частотной и токовой зависимостей теплового импеданса и т.д.

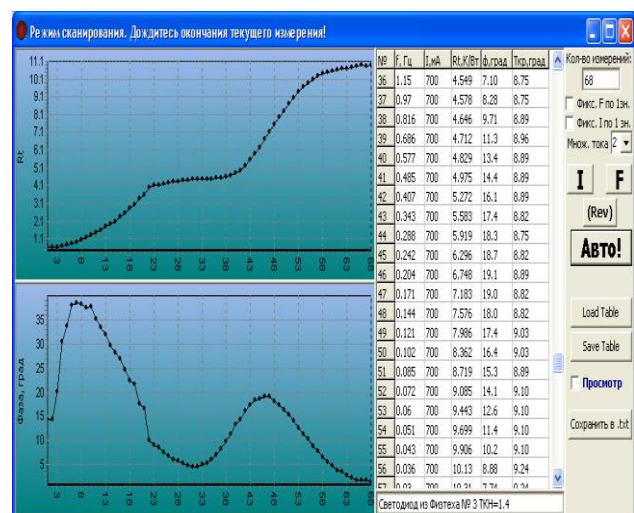
Программа LED Meter позволяет реализовать следующие режимы работы:

- режим однократного измерения теплового импеданса при заданной частоте модуляции греющей мощности;
- режим сканирования по частоте модуляции при заданном токе;
- режим линейной модуляции греющей мощности;
- тестовый режим;
- режим контроля функционированием комплекса.

На рис. 6 представлен интерфейс программы LED Meter для двух режимов измерения: однократном и режиме сканирования по частоте модуляции. Первый предназначен для измерения компонент теплового сопротивления при заданной частоте модуляции греющей мощности (рис. 6а). Второй режим позволяет получить зависимость модуля и фазы теплового импеданса от частоты модуляции и на основе ее анализа – информацию о вкладе отдельных элементов конструкции светодиода в его полное тепловое сопротивление.



а)



б)

Рис. 6. Интерфейс программы управления функционированием комплекса LED Meter в режиме однократного измерения (а) и в режиме сканирования по частоте модуляции (б)



В верхнем графическом окне (рис. 6б) показан спектр модуля теплового импеданса (теплового сопротивления  $R_T$ ), в нижнем окне – спектр фазы теплового импеданса. На частотной зависимости  $R_T(f)$  имеются ряд участков, на которых тепловое сопротивление практически не изменяется, а сдвиг фаз между температурой перехода и греющей мощностью принимает минимальные значения. Это указывает на то, что при этих частотах практически вся рассеиваемая в диоде переменная составляющая мощности идет на нагрев какого-либо слоя структуры диода или элемента его конструкции. Значения компонент полного теплового сопротивления определяются в области частот, соответствующих минимуму фазы теплового импеданса (в области «полок» теплового сопротивления).

Для более надежного выделения компонент теплового сопротивления разработана методика обработки экспериментальной зависимости  $R_T(f)$ , которая включает в себя процедуру сглаживания методом «скользящего среднего», вычисления производной  $dR_T/df$  и построения зависимости  $(dR_T/df)^{-1}$  от  $R_T$ . Результат такой обработки показан в нижнем графическом окне на рис. 7а.

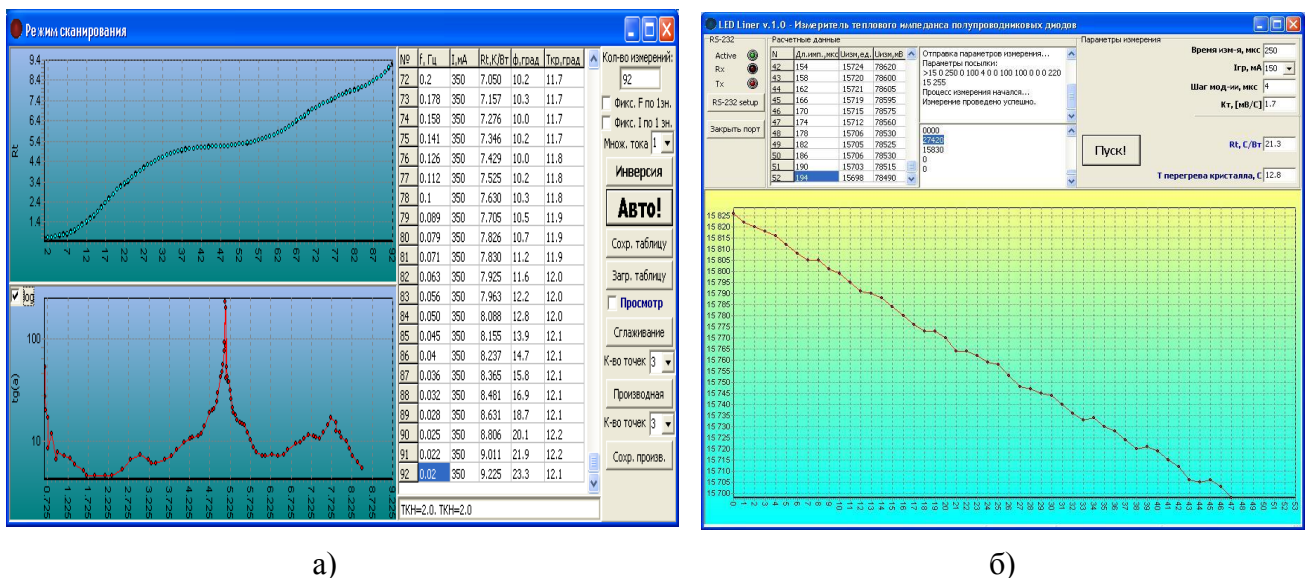


Рис. 7. Результат обработки спектра (а) и интерфейс программного модуля «Режим линейной модуляции» (б)

На рис. 7б показан интерфейс в режиме линейной модуляции греющей мощности, который в основном используется при измерении компонент теплового сопротивления, связанных с активной областью кристалла. В графическом окне показана временная зависимость ТЧП (прямого напряжения на диоде в единицах АЦП), которая имеет линейный характер. Тепловое сопротивление определяется тангенсом наклона, для вычисления которого используется метод наименьших квадратов.

В четвертой главе представлены результаты исследований метрологических характеристик прибора, обоснованы реализуемые в приборе диапазоны греющего тока и частоты модуляции. Кроме этого, произведен сравнительный анализ частотного метода измерения теплового сопротивления светодиодов,



использующего нагрев гармонической ШИМ мощностью, и временного метода, использующего нагрев ступенчато изменяющейся мощностью (стандарт JESD51-1). Показано, что оба метода полностью согласуются между собой и в пределах погрешности дают одинаковые результаты

Погрешность измерений теплового сопротивления  $R_T$  складывается из погрешности определения температурного коэффициента напряжения  $K_T$  (погрешности градуировки); погрешности измерения напряжения  $U_{гр}$  на вершине греющего импульса, обусловленного нелинейностью АЦП; погрешности измерения  $U_{ТЧП}$ , обусловленной временной задержкой после окончания греющих импульсов, а также квантованием сигнала с помощью АЦП; погрешности формирования греющего тока  $I_{гр}$ .

Расчеты показали, что наибольший вклад вносит погрешность, обусловленная нелинейностью функции преобразования АЦП ( $\delta_{АЦП} = 0,8\%$ ) и погрешность измерения температуры перехода, обусловленная временной задержкой на ожидание окончания переходных электрических процессов ( $\delta_T = 0,6\%$ ). Другие составляющие погрешности пренебрежимо малы. Если принять, что все составляющие не коррелируют друг с другом и общая погрешность измерения равна утроенному значению среднеквадратичного отклонения (интервал «три сигма»), то общая погрешность измерения теплового сопротивления составляет  $\delta_{\Sigma} = 3\%$ .

Сравнение частотного метода с временным (стандарт JESD51-1) производилось на основе анализа теплоэлектрической модели, которая представляет собой последовательность  $n$  звеньев из RC-цепочек. Если на вход такой модели поступает входное воздействие в виде единичной ступеньки греющей мощности  $P(t) = 1 \text{ Вт}$  ( $t \geq 0$ ), то откликом (переходной характеристикой) является температура перехода  $T(t)$ :

$$T(t) = \sum_{i=1}^n R_{Ti} \cdot \left[ 1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}} \right],$$

где  $\tau_i = R_{Ti} \cdot C_i$  – тепловая постоянная времени  $i$ -го звена конструкции прибора;  $R_{Ti}$  и  $C_i$  – тепловое сопротивление и теплоемкость  $i$ -го звена.

При частотном описании системы связь между входным воздействием  $P(\omega)$  и откликом  $T(\omega)$  определяется тепловым импедансом  $Z_T(j\omega)$ , который согласно теплоэлектрической аналогии будет иметь вид:

$$Z_T(j\omega) = \sum_{i=1}^n \frac{R_{Ti}}{1 + j\omega\tau_i}. \quad (7)$$

Связующим звеном между временным и частотным описанием модели является импульсная характеристика  $h(t)$  – отклик на  $\delta$ -подобный импульс греющей мощности. Импульсная характеристика представляет собой первую производную переходной характеристики по времени

$$h(t) = \frac{dT(t)}{dt}.$$

С другой стороны, импульсная характеристика и тепловой импеданс связаны между собой преобразованием Фурье:

$$Z_T(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \cdot e^{j\omega t} dt. \quad (8)$$

Моделирование переходной характеристики  $T(t_i)$  осуществлялось для трехзвенной модели при следующих параметрах:  $R_i = \{110, 50, 40\}$  К/Вт;  $\tau_i = \{0.01, 0.5, 3\}$  с. Временные отсчеты  $t_i$  выбирались равномерно по логарифмической шкале времени (200 отсчетов на декаду). Последующая обработка включает в себя сплайн-интерполяцию, которая позволяет из исходного массива  $T(t_i)$  получить непрерывную зависимость  $T(t)$ . Дифференцированием  $T(t)$  вычисляется импульсная характеристика  $h(t)$  и далее согласно (8) – зависимость теплового сопротивления (модуля теплового импеданса) от частоты модуляции греющей мощности. Результаты расчета  $R_T(f)$  представлены на рис. 8 (кривая 1).

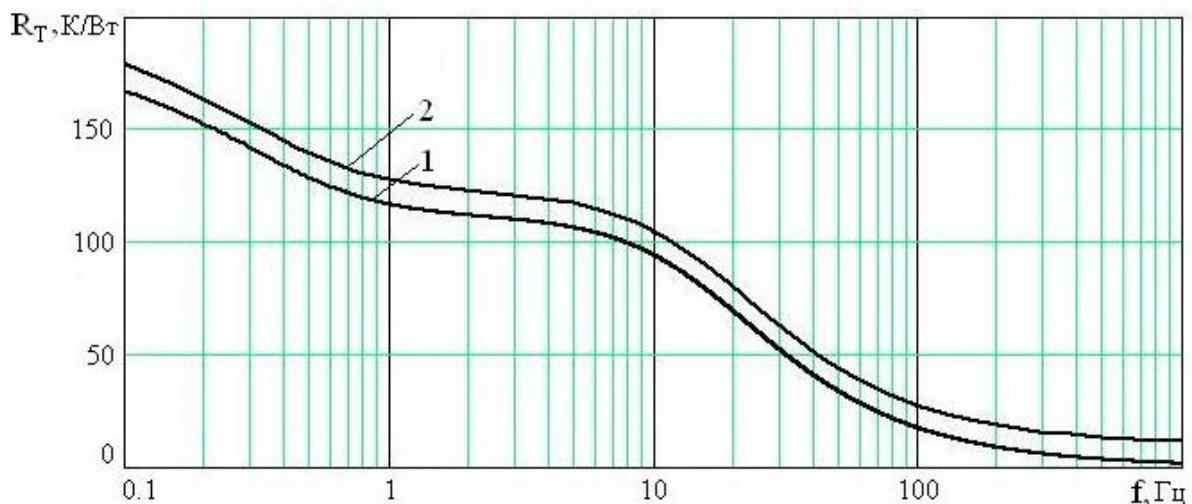


Рис. 8. Зависимости теплового сопротивления от частоты модуляции греющей мощности, рассчитанные временным методом (1) и частотным методом (2)

Аналогичная зависимость  $R_T(f)$  вычислялась на основе спектрального метода с использованием выражения (7). Результаты расчета представлены на рис. 8 (кривая 2), причем для удобства восприятия кривая 2 смещена вверх по оси ординат на 10 единиц. Видно, что результаты расчета теплового сопротивления, полученные обоими методами, практически совпадают. Это позволяет сделать вывод, что временной метод (стандарт JESD51-1) и частотный метод, использующего нагрев гармонической ШИМ мощностью, дают одинаковые результаты измерения теплового сопротивления.

С целью экспериментального подтверждения полученных результатов были произведены измерения теплового сопротивления партии светодиодов с

помощью разработанного в диссертационной работе измерительного комплекса (реализующего частотный метод измерения) и измерительного комплекса T3Ster производства MicRed Ltd (реализующего временной метод измерения). На T3Ster измерения проводились сотрудниками Физико-технического института имени А.Ф. Иоффе РАН. Результаты, полученные различными средствами измерений теплового сопротивления, хорошо согласуются друг с другом.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Основные результаты и выводы, полученные в ходе выполнения работы:

1. Разработан способ измерения теплового импеданса светодиодов, заключающийся в их нагреве ШИМ мощностью, изменяющейся по гармоническому закону, и измерении отклика на это воздействие – переменной составляющей температуры перехода светодиода.

2. Разработана математическая модель кинетики нагрева светодиода гармонической ШИМ мощностью и на ее основе исследовано влияние на точность и чувствительность способа измерения теплового импеданса таких параметров, как период следования греющих импульсов, частота и коэффициент модуляции, количество греющих импульсов за период модуляции.

3. Для измерения компоненты теплового сопротивления светодиодов, связанной с активной областью кристалла, предложен способ измерения, использующий ШИМ греющую мощность, изменяющуюся по линейному закону.

4. Разработан и изготовлен автоматизированный комплекс для измерения теплового импеданса светодиодов, программное обеспечение которого позволяет настраивать его на решение широкого круга задач.

5. Произведена оценка погрешности измерения теплового сопротивления, которая складывается из следующих составляющих:

- погрешности определения температурного коэффициента напряжения;
- погрешности измерения напряжения на вершине греющего импульса, обусловленного нелинейностью АЦП;
- погрешности измерения ТЧП, обусловленной временной задержкой после окончания греющих импульсов,
- погрешности квантования сигнала с помощью АЦП;
- погрешности формирования греющего тока.

Расчеты показали, что результирующая погрешность не превышает 3 %.

6. Произведен сравнительный анализ частотного метода измерения теплового сопротивления светодиодов, использующего нагрев гармонической ШИМ мощностью, и временного метода, использующего нагрев ступенчато изменяющейся мощностью (стандарт JE5D51-1). Показано, что оба метода полностью согласуются между собой и дают одинаковые результаты, что подтверждает адекватность частотного метода.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Гавриков, А. А. Микропроцессорный измеритель теплового сопротивления полупроводниковых диодов / В. А. Сергеев, В. И. Смирнов, А. А. Гавриков, В. В. Юдин // Известия высших учебных заведений. Электроника. – 2009. – №4. – С. 84-86.
2. Гавриков, А. А. Измеритель теплового импеданса полупроводниковых диодов с широтно-импульсной модуляцией греющей мощности / В. А. Сергеев, В. И. Смирнов, А. А. Гавриков, М. Л. Конторович // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2010. – №3. – С.45-47.
3. Гавриков, А. А. Способ измерения теплового импеданса полупроводниковых диодов / В. А. Сергеев, В. И. Смирнов, А. А. Гавриков, В. В. Юдин // Патент РФ № 2402783, G01 R 31/26. Опубл. 27.10.10. Бюл. № 30.

Статьи и материалы конференций

4. Гавриков, А. А. Программа-оболочка измерительного комплекса / А. А. Гавриков // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники. Тезисы 9-й региональной школы семинара. – Ульяновск : УлГТУ, 2006. – С. 25.
5. Гавриков, А. А. Применение преобразования Гильберта для выделения огибающей сигнала / А. А. Гавриков // Материалы 10-й региональной школы семинара «Актуальные проблемы физической и функциональной электроники». – Ульяновск : УлГТУ, 2007. – С. 39-40.
6. Гавриков, А. А. Микропроцессорный измеритель теплового сопротивления светодиодов. / В. А. Сергеев, В. И. Смирнов, А. А. Гавриков, М. Л. Конторович // Межвузовский сборник научных трудов «Радиоэлектронная техника». – Ульяновск : УлГТУ, 2008. – С. 60-65.
7. Гавриков, А. А. Измеритель теплового импеданса светодиодов с широтно-импульсной модуляцией греющей мощности / А. А. Гавриков // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники. Материалы 12-й региональной школы семинара. В 2 т. Т.1. – Ульяновск : УлГТУ, 2009. – С. 39-40.
8. Гавриков, А. А. Измеритель теплового импеданса светодиодов. / А. А. Гавриков // Материалы 12-й региональной научной школы-семинара «Актуальные проблемы физической и функциональной электроники». В 2 т. Т.2. – Ульяновск : УлГТУ, 2009. – С. 35-37.
9. Гавриков, А. А. Способ измерения теплового импеданса полупроводниковых диодов и его практическая реализация / В. А. Сергеев, В. И. Смирнов, А. А. Гавриков, М. Л. Конторович, В. В. Юдин // Межвузовский сборник научных трудов «Радиоэлектронная техника». – Ульяновск : УлГТУ, 2009. – С. 90-96.

10. Гавриков, А. А. Схемотехническое моделирование тепловых процессов в светодиодах / А. А. Гавриков // Материалы XXV ВНТК «Методы и средства измерения физических величин». – Н.Новгород, 2011. – С. 34.
11. Гавриков, А. А. Сравнительный анализ методов измерения теплового сопротивления полупроводниковых приборов // Тезисы докладов 1-й ВНК «Устройства измерения, сбора и обработки сигналов в информационно-управляющих комплексах». – Ульяновск : УлГУ, 2011. – С. 123-124.
12. Гавриков, А. А. Сравнительный анализ методов измерения теплового сопротивления полупроводниковых приборов / В. И. Смирнов, А. А. Гавриков // Тезисы докладов Междунар. школы-конференции «Фундаментальная математика и ее приложения в естествознании». – Уфа : БашГУ, 2011. – С. 30.
13. Гавриков, А. А. Компьютерное моделирование кинетики нагрева светодиодов гармонической широтно-импульсно модулированной мощностью / В. А. Сергеев, В. И. Смирнов, А. А. Гавриков // Межвузовский сборник научных трудов «Радиоэлектронная техника». – Ульяновск : УлГТУ, 2011. – С. 67-77.
14. Гавриков, А. А. Сравнительный анализ временного и частотного методов измерения теплового сопротивления полупроводниковых приборов / В. А. Сергеев, В. И. Смирнов, А. А. Гавриков // Межвузовский сборник научных трудов «Радиоэлектронная техника». – Ульяновск : УлГТУ, 2011. – С. 100-110.

Подписано в печать 27.12.2011  
Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 1,40  
Тираж 80 экз. Заказ 1290  
Типография УлГТУ,  
432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д. 32